

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA DEL RÍO COELLO (DEPARTAMENTO
DEL TOLIMA, COLOMBIA) CON EL PROGRAMA
HYDROBID**

**HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE
COELLO RIVER BASIN (DEPARTMENT OF
TOLIMA, COLOMBIA) WITH THE HYDROBID
PROGRAM**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D. FREDDY LEVERI AMAYA

Dirigido por:

Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR

Alcalá de Henares, a 15 de junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme el tiempo, la salud y la sabiduría para el desarrollo de esta maestría y la culminación del trabajo final de la misma. A mi esposa e hijas por su apoyo incondicional en todos los momentos difíciles e incentivarme todos los días para culminar este proceso de aprendizaje.

Finalmente, al Doctor Juan Pascual por su orientación y dirección de este trabajo de grado, así como sus valiosos aportes para el mejoramiento de este.

ÍNDICE

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Objetivo General.....	14
1.2. Objetivos Específicos	14
1.3. Localización y Caracterización de la cuenca del río Coello.....	14
1. METODOLOGÍA	18
1.1. Etapas 1: Visión general del programa HydroBID	19
1.2. Etapas 2: Recopilación y análisis de información existente en la cuenca	21
1.2.1. Información Hidroclimatológica	21
1.2.2. Información de uso del suelo	24
1.3. Etapas 3: Construcción y Parametrización del modelo HydroBID	24
1.3.1. Construcción del modelo.....	24
1.3.2. Parametrización del modelo.....	28
1.4. Etapas 4: Desarrollo y Calibración del modelo HydroBID	29
1.4.1. Calibración modelo HydroBID	30
1.5. Etapas 5: Variación de Parámetros por Cambio climático	32
2. RESULTADOS	34
2.1. Tratamiento de datos hidrológicos	34
2.2. Desarrollo y Calibración del Modelo HydroBID	36
2.3. Modelo: Escenario Actual	41
2.4. Escenario de Cambio Climático	46
3. DISCUSIÓN.....	49
4. CONCLUSIONES	55
5. BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Cuenca hidrográfica del río Coello.	15
Figura 2. Mapa de Pendientes de la Cuenca del Rio Coello.	15
Figura 3. Isoyetas de precipitación total anual de la Cuenca del río Coello.	17
Figura 4. Cobertura de Tierra de la Cuenca del río Coello.	17
Figura 5. Visualización de la Base hidrográfica para América Latina propuesta en la base de datos LAC-AHD.	20
Figura 6. Localización de las estaciones hidroclimatológicas en la cuenca del río Coello.	22
Figura 7. Construcción de Base de datos para HydroBID.	25
Figura 8. Organización de los registros climatológicos para la base de datos.	26
Figura 9. Organización de los registros de caudales para la base de datos	26
Figura 10. División e identificación de subcuencas del río Coello con la base de datos LAC-AHD.	26
Figura 11. Interfaz Climate Data Interpolating Tool HydroBID.	27
Figura 12. Interfaz de inicio Setup HydroBID.	28
Figura 13. Interfaz de parametrización HydroBID.	29
Figura 14. Interfaz de escenarios climáticos HYDRO_BID	32
Figura 15. Proyecciones medias de cambio de temperatura y precipitación Global	33
Figura 16. Correlación Estación de Caudales Payande – Estación de Caudales El Carmen.	35
Figura 17. Correlación Estación Pluviométrica El Plan – Estación Pluviométrica Cucuana.	35
Figura 18. Grafica de Doble Masas para la Estación El Plan - Estación Cucuana.	35
Figura 19. Grafica de Doble Masas para la Estación Las Delicias - Estación Cajamarca.	35
Figura 20. Grafica de Doble Masas para la Estación. Palogrande - Estación Cucuana.	35
Figura 21. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Cucuana.	35
Figura 22. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación El Carmen.	35
Figura 23. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Payande.	35
Figura 24. Serie histórica de temperatura media para la estación Cucuana.	36

Figura 25. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados	37
Figura 26. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados	38
Figura 27. Correlación de Caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado	40
Figura 28. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado	40
Figura 29. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado	41
Figura 30. Delimitación de cuenca hasta la estación de caudales Payande con base de datos LAC-AHD incluyendo estaciones Hidroclimatológicas	42
Figura 31. Delimitación de la cuenca total del río Coello hasta su salida al río Magdalena con la base de datos LAC-AHD incluyendo estaciones Hidroclimatológicas	44
Figura 32. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en su Estado Actual	45
Figura 33. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en su Estado Actual	45
Figura 34. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en escenario 1	47
Figura 35. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en Escenario 1	47
Figura 36. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en escenario 2	48
Figura 37. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en escenario 2	49
Figura 38. Rendimiento hídrico Total para condiciones de año medio en Colombia.	51
Figura 39. Escorrentía Media Anual para condiciones de año medio en Colombia.	52
Figura 40. Comparativo de escenarios de Cambio Climático para los resultados de Flujo Total en la cuenca del río Coello	53
Figura 41. Total Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Morfología de la Cuenca del río Coello.	16
Tabla 2. Estaciones Hidroclimatológica seleccionadas.	21
Tabla 3. Parámetros para la calibración del Modelo.	30
Tabla 4. Rangos de Parámetros estadísticos para calibración del Modelo.	31
Tabla 5. Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial en HYDROBID. ...	37
Tabla 6. Parámetros hidráulicos definidos en calibración del Modelo.	39
Tabla 7. Parámetros Estadísticos de la modelación Calibrada en HYDROBID.	39
Tabla 8. Definición de parámetros calculados en los resultados del balance hídrico calculado por HydroBID.	42
Tabla 9. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello hasta la estación Payande.	43
Tabla 10. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello hasta salida.	44
Tabla 11. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello para el escenario 1 de cambio climático.	46
Tabla 12. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello para escenario 2 de cambio climático.	48

TABLA DE ABREVIATURAS

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CN: *Curve Number*

CSV: *Comma Separated Values*

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

ENSO: *El Niño-Southern Oscillation*

ESRL: *Earth System Research Laboratory - NOAA*

GWLF: *Generalized Watershed Loading Function*

HEC -HMS: *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*

HWSD: *Harmonized World Soil Database*

IDEAM: Instituto de hidrología, Meteorología y estudios ambientales

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAC-AHD: *Latin América and the Caribbean - Analytical Hydrology Dataset*

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce*

PSD: *Physical Sciences Division - ESRL*

RTI: *Research Triangle Institute*

SCS: *Soil Conservation Service*

SIG: Sistema de Información Geográfica

SZH: Subzona hidrográfica

SQLite: *Structured Query Language lite*

UNDP: *United Nations Development Programme*

USGS: *United states Geological Survey*

USOCOELLO: Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los ríos Coello y Cucuana

QGIS: *Quantum Geographic Information System*

RESUMEN

Con el ánimo de contar con una herramienta práctica para la gestión del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas colombianas, en el presente trabajo se desarrolló la caracterización hidrográfica de la Cuenca del río Coello, en el departamento de Tolima, Colombia, mediante la Herramienta HydroBID desarrollada por el BID en colaboración con el RTI.

La cuenca del río Coello se localiza en la parte centro norte del departamento del Tolima, en inmediaciones de la cordillera central colombiana, con una extensión aproximada de 1842 Km², siendo parte integral de la cuenca alta del río Magdalena, afluente principal de Colombia.

En el desarrollo del modelo en la herramienta HydroBID, se consideraron como principales áreas de estudio la hidrología, incluyendo el estudio estadístico para la complementación y homogenización de datos, el manejo de cartografía y SIG; conocimiento y utilización de programas para la modelización hidrológica de cuencas y la gestión integral del recurso hídrico frente a los cambios climáticos que sufre la región.

Para la caracterización de la cuenca se desarrollaron 5 etapas metodológicas, iniciando con una visión general de la herramienta, su entorno y software de apoyo; posteriormente se realizó la adquisición, ordenamiento y complementación de la información climatológica base de la cuenca en estudio; se continuó con la construcción de la base de datos para la alimentación de HydroBID con la revisión y definición de parámetros hidrológicos para el desarrollo del modelo; seguidamente, se desarrolló la puesta en marcha de la herramienta con su calibración, considerando los datos de caudales registrados en la cuenca estudiada, para finalmente obtener resultados hidrológicos confiables y proceder a la variación de escenarios climáticos como herramienta para la gestión del recurso hídrico en décadas futuras.

Con los resultados obtenidos se observó que la herramienta HydroBID logra una calibración aceptable del modelo respecto a los datos históricos de caudales de la cuenca, generando volúmenes de error menores al 5% de la correlación media entre los datos modelados y los observados en la misma. Lo anterior, genera una buena confiabilidad en el

volumen total final de flujo a la salida de la cuenca, y valores de oferta hídrica bastante cercanos a los dictaminados por el IDEAM en el ENA 2014 y 2018 para la región de la cuenca del río Coello.

En cuanto a la caracterización hidrográfica de la cuenca, se observa, en su estado actual, una tendencia moderadamente decreciente en su flujo total anual para las décadas analizadas, mostrando una posible pérdida de oferta hídrica en años futuros. Lo anterior, es concordante con los escenarios de cambio climático realizados, teniendo en cuenta que al proponer una elevación de temperatura en 2°C en las próximas décadas, sumado a la variación positiva y negativa de precipitación en un 20%, se evidencian incrementos de evapotranspiración, lo que para uno de los escenarios generará pérdidas importantes de flujo en la cuenca próximas al 38% respecto al volumen promedio modelado para las décadas actuales; y en el otro, se podrían presentar incrementos cercanos al 26% del flujo, por lo que existe la necesidad de contar, por parte de la autoridad ambiental colombiana, con una gestión integral del manejo del recurso hídrico en la cuenca para minimizar los posibles efectos de desabastecimiento o eventos extremos de inundación particularmente en la parte final de la cuenca del río Coello.

1. INTRODUCCIÓN

La hidrografía colombiana es una de las más extensas y ricas de América latina, contando en la actualidad con el 5% del recurso hídrico del planeta (IDEAM ENA, 2018); sin embargo, esta oferta hídrica no se encuentra repartida de manera equitativa sobre el área geográfica del territorio colombiano, lo que ha generado zonas con excesos de precipitación como es el caso de la región de los Llanos Orientales y la región Pacífica colombiana, y por otro lado zonas áridas y susceptibles a desabastecimientos como ocurre al norte de la región Atlántica del territorio. Además, también se debe tener en cuenta los cambios climáticos producidos por los efectos del ENSO (IDEAM, Tomo 1, 2015), que han generado sobre la hidrografía colombiana variaciones importantes de los regímenes de precipitación y, consecuentemente, inundaciones y sequías extremas con periodicidades cada vez más cortas; afectando de manera importante las cuencas de cauces naturales que sirven para el abastecimiento de la población y que en la mayoría de los casos se encuentran sobre las riberas.

Por lo anterior, es de vital importancia, además de contar con un registro temporal homogéneo y completo de la hidrología y climatología de la región, tener acceso a programas de simulación y modelación de hidrología que se aproximen cada vez más a la realidad de las cuencas hidrográficas, representando los diferentes procesos que se dan dentro de estas, como transformar inicialmente una cierta precipitación en escorrentía (Pascual y Diaz, 2016), además de representar un balance hídrico acertado que pueda servir para la gestión integral del recurso hídrico en la misma. De igual manera, contar con opciones de simulación de transporte de sedimentos, calidad de agua y cambios climáticos futuros.

Entre los programas comerciales más utilizados en el medio colombiano para la simulación de escorrentía en cuencas, principalmente para la determinación de caudales en eventos extraordinarios utilizados para diseño, destaca el software HEC-HMS (IDEAM, 2018), desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos para la simulación de procesos hidrológicos en sistemas de cuencas detríticas (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). Sin embargo, esta herramienta no cuenta en la actualidad con opciones de simulación de cambios climáticos, por lo que es poco eficaz a la hora de gestionar los recursos hídricos futuros de una cuenca.

Es así como recientemente el BID, conociendo las necesidades de la región de América latina y el Caribe, también sus perspectivas ante el cambio climático, que pueden afectar el desarrollo de proyectos gestionados por ellos y los diferentes países, concibió la herramienta HydroBID para dar soporte a la región en el manejo y planificación del recurso hídrico (<http://sp.hydrobidlac.org/>).

Esta herramienta tiene la capacidad de realizar simulaciones hidrológicas y gestionar los recursos hídricos de una cuenca en diferentes escenarios de cambio climático, uso de suelo, población, etc.; parametrizado con una base de datos robusta, que dentro de sus atractivos cuenta con un número importante de subcuencas delimitadas con muy buena precisión de toda la región de América Latina y el Caribe, incluyendo patrones de drenaje, longitudes de escorrentías, pendientes y las características del suelo en las cuencas, las cuales son representadas por el número adimensional CN desarrollado por el SCS, en su método de abstracciones de precipitación de tormentas (Chow et al. 1994). Este parámetro fue definido en la herramienta HydroBID, con base en obtención de información de cobertura terrestre del USGS y armonizada con los datos de suelo de la HWSD (SPOC HydroBID, 2019).

Conforme a lo expuesto, la herramienta más allá de dar un resultado puntual en la obtención de la escorrentía de una cuenca en particular para la solución de un problema ingenieril, como lo hacen gran parte de los modelos hidrológicos, se enfoca de manera práctica en la determinación del balance y producción hídrica de una región o cuenca con la cual se puedan elaborar planes de acción y gestión del recurso hídrico ante escenarios de cambio.

En consecuencia, para un país en vía de desarrollo como lo es el territorio colombiano (UNDP, 2018), la herramienta puede ayudar a fortalecer la toma de decisiones ante las incertidumbres que genera la disponibilidad del recurso hídrico en los planes de gestión ambiental y ordenamiento regional y local que se vienen desarrollando y actualizando a la fecha.

Con base en lo expuesto previamente, se optó por desarrollar el modelo HydroBID en un sector de la región Andina colombiana, en la cual se concentra una porción importante de

la población del país (DANE, 2018), y por ende constituye un reto en el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico para las autoridades ambientales colombianas. Es así como la cuenca hidrográfica adoptada corresponde a la del río Coello, la cual se ubica en inmediaciones del departamento del Tolima, y por tanto da lugar a la proposición del objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo, al igual que a la localización general de la cuenca en estudio.

1.1. Objetivo General

Analizar la aplicación de la herramienta HydroBID al territorio colombiano y dar a conocer su potencial utilidad en la modelación hidrológica de cuencas y apoyo técnico para la toma de decisiones eficaces en estudios de gestión de recursos hídricos adaptados a futuros cambios climáticos.

1.2. Objetivos Específicos

- Construcción y desarrollo del modelo HydroBID en una cuenca típica de la región Andina colombiana.
- Calibración de los resultados obtenidos en el Modelo HydroBID con series históricas de flujos observados en la cuenca de estudio.
- Elaboración y evaluación de escenarios de cambio climático en el Modelo HydroBID considerando las perspectivas globales.

1.3. Localización y Caracterización de la cuenca del río Coello

La cuenca Mayor del río Coello se seleccionó por ser una cuenca característica de la región Andina colombiana (Figura 1), presente dentro de la zonificación hidrográfica Magdalena-Cauca, subzona del Alto Magdalena con codificación SZH número 2121 (IDEAM, 2013), con una extensión total de 1842 km² correspondiente al 7,8% del área total del departamento del Tolima. Su nacimiento hace parte de la red hidrográfica del parque nacional de los Nevados, iniciando su recorrido como río Toche en inmediaciones del nevado del Tolima con una elevación aproximada de 5000 m.s.n.m, discurriendo de occidente a oriente por la Cordillera Central colombiana, donde recibe afluentes relevantes como el río Tohecito, río Bermellon y río Combeima, hasta llegar a su confluencia con el río Magdalena a una elevación aproximada de 255 m.s.n.m. (CORTOLIMA, 2004).

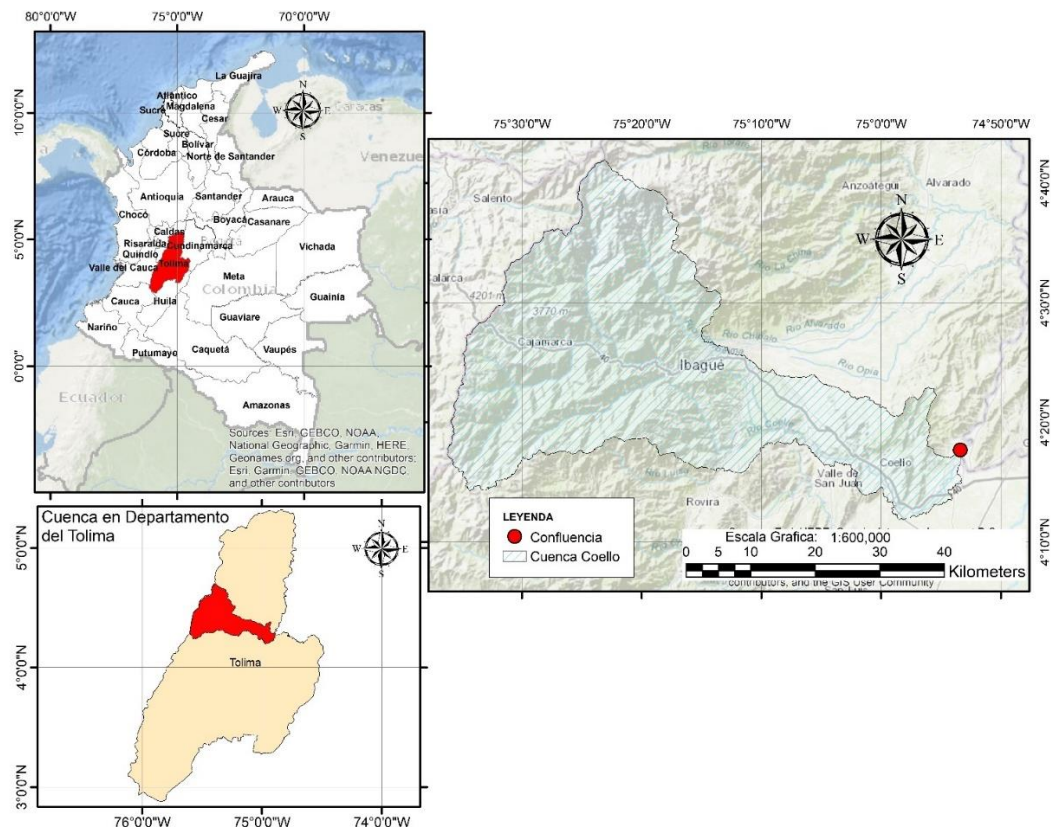


Figura 1. Localización de la Cuenca hidrográfica del río Coello.

La cuenca tiene una longitud aproximada, desde su nacimiento hasta su salida, de 125,8 km con una pendiente media de 50,14%, pendientes máximas en la parte alta superiores al 100%, y en los sectores de la parte media y final de la cuenca se presentan pendientes inferiores al 5% (Figura 2).

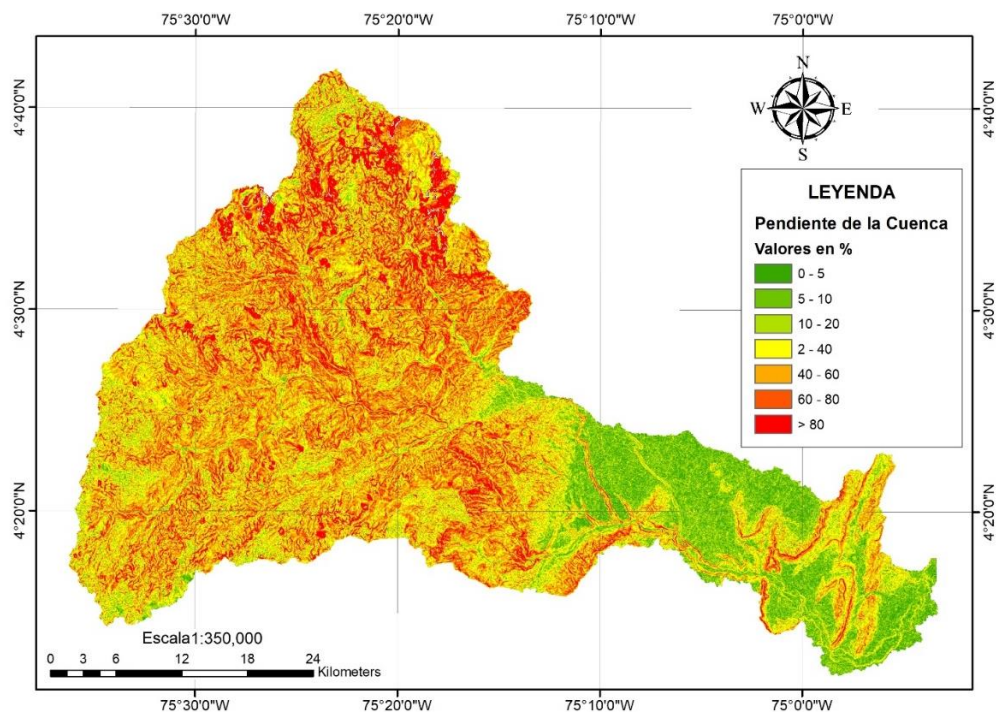


Figura 2. Mapa de Pendientes de la Cuenca del Río Coello.

Entre sus características más relevantes, la hoya hidrográfica y su red principal cuentan con la siguiente morfología (Tabla 1):

Tabla 1. Morfología de la Cuenca del río Coello.

PARÁMETRO	VALOR
Factor de Forma	0,12
índice de Compacidad	2,03
Densidad de Drenaje	3,71
Índice de Sinuosidad	1,29
Perímetro de Cuenca	311744,00 m
Pendiente del Cauce Principal	1,28%

De la definición de los parámetros anteriores, se puede observar que la cuenca tiene una forma oblonga o alargada, por lo que se considera que la cuenca tendrá tiempos de respuesta menores ante una lluvia generando picos de crecientes relativamente moderados. De igual forma, la densidad de drenaje es alta por lo que, se puede concluir, que la cuenca tendrá una preponderancia al flujo en el cauce que al de ladera, por consiguiente, un menor tiempo al alcanzar el pico de crecient. (Ochoa, 2011).

Por otra parte, la cuenca presenta gran diversidad de climas partiendo de provincias nivales, zonas de páramo y clima frio, hasta zonas templadas y cálidas de tipo árido. Las temperaturas promedio de la cuenca se encuentran en 19,8°C, con temperaturas menores a 7°C en alturas superiores a los 3700 m.s.n.m. y zonas cálidas con temperaturas superiores a los 24°C en alturas inferiores a los 1000 m.s.n.m. (CORTOLIMA, 2004)

Con base en el método de las Isoyetas (Breña y Jacobo, 2006), se presentan valores promedio de precipitación en la cuenca de 1510 mm/año, con máximos anuales próximos a los 2250 mm/año y mínimos cercanos a los 1000 mm/año (Figura 6).

Por otra parte, la diversidad de cobertura terrestre en la cuenca es bastante amplia, partiendo de coberturas forestales de tipo bosque natural, intervenido y secundario, así como bosque plantado del orden de 29,83% del total del área de la cuenca, ubicados principalmente en la parte media y alta de la cuenca, esta última forma parte de la zona de protección del Parque Nacional de los Nevados (Figura 4). De igual manera, se cuenta con pastos naturales y de tipo manejado, para uso de pastoreo, del orden 38,36%, ocupando principalmente la parte media y baja de la cuenca (CORTOLIMA, 2004).

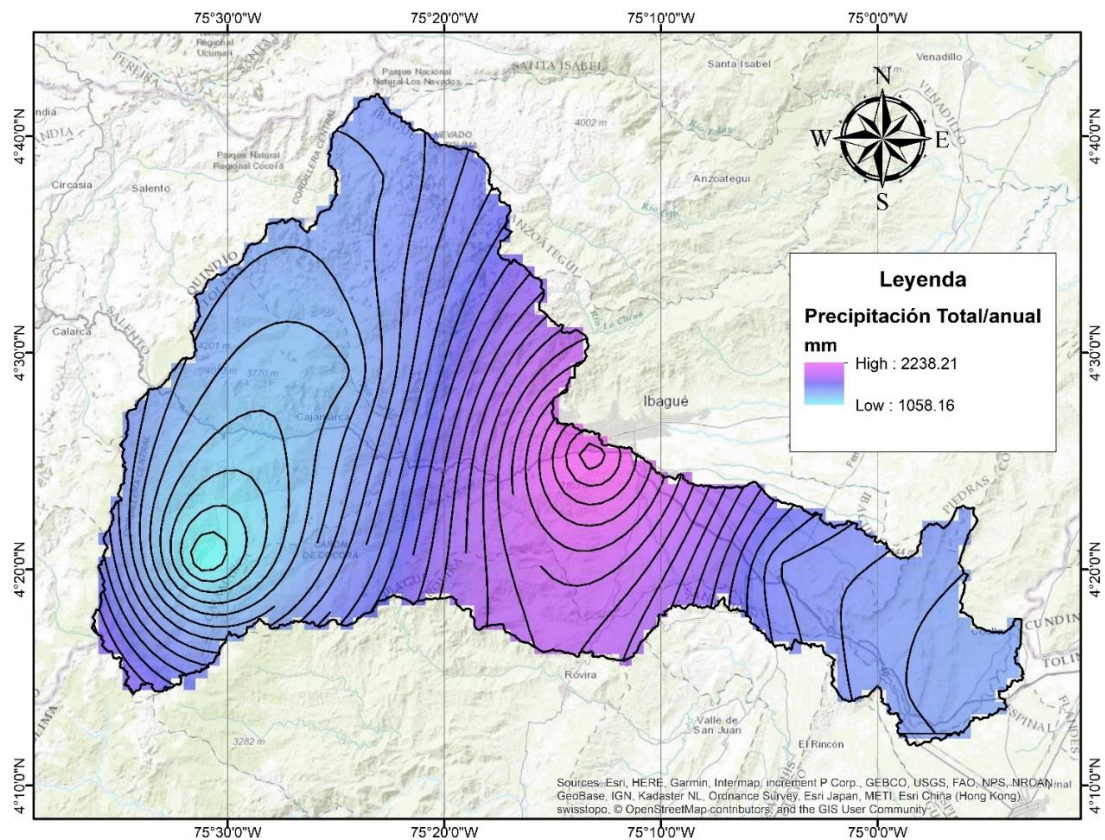


Figura 3. Isoyetas de precipitación total anual de la Cuenca del río Coello.

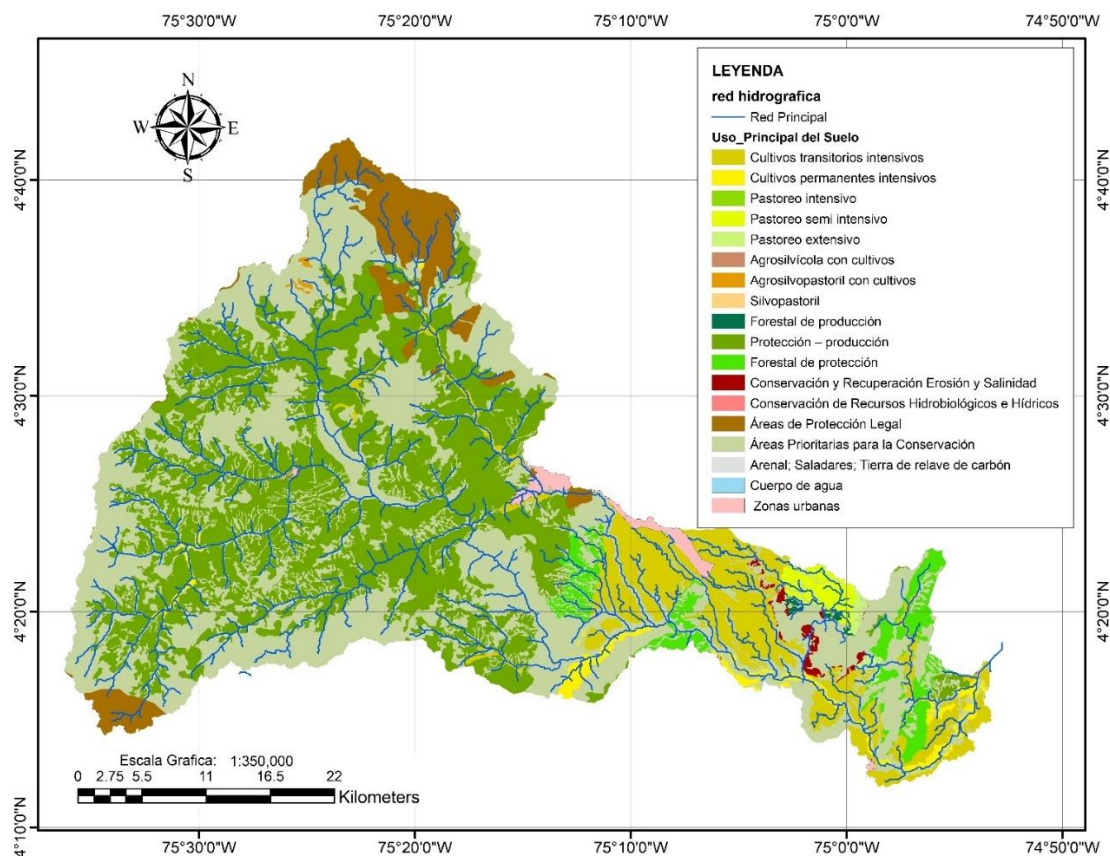


Figura 4. Cobertura de Tierra de la Cuenca del río Coello.

Fuente: Adaptado por autor de mapa Oferta Ambiental Colombia Escala 1:100.000, IGAC

Otras de las coberturas relevantes en la cuenca del río Coello, corresponden a la vegetación de tipo paramo y rastrojo que alcanzan un valor aproximado de 14,85% del área total de la cuenca, y otras áreas sin uso agropecuario o forestal, donde se encuentran principalmente cuerpos de agua, zonas urbanas, afloramientos rocosos, zonas de explotación, entre otros, ocupando un aproximado de 4% del área de la cuenca.

Asimismo, es importante mencionar que hacen parte de la cuenca del río Coello como territorio rural los municipios de Rovira, San Luis, Espinal y Flandes, adicionales a los cascos urbanos de los municipios de Ibagué, Coello y Cajamarca con su jurisdicción rural; gran parte de estas poblaciones se abastecen y desaguan sus vertidos sobre los cauces secundarios de la cuenca del río Coello.

De las coberturas anteriores cabe resaltar el porcentaje de áreas de pastos, ya que ocupan una porción importante en la cuenca, lo que puede afectar en gran medida el comportamiento de la infiltración en los suelos, desarrollando superficies mayormente impermeables, por ser pastos introducidos para pastoreos intensivos, con aumento de erosión y mayores picos de esorrentías (CORTOLIMA, 2004).

Por último, la cuenca en la actualidad cuenta con 15 estaciones hidroclimatológicas activas, entre las cuales se cuenta con estaciones pluviométricas, climatológicas y limnimétricas, lo que le da un atractivo importante para la construcción, interpolación de datos y calibración del modelo HydroBID con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo.

1. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos definidos, se propuso una metodología que consta de 5 etapas enfocadas en una visión general del programa HydroBID, la recopilación de información existente en la cuenca utilizada para el modelo, parametrización y construcción de base de datos del modelo HydroBID, desarrollo y calibración del modelo respecto a la información registrada en la cuenca y variación de parámetros por cambio climático en la cuenca ante eventos futuros.

1.1. Etapa 1: Visión general del programa HydroBID

Considerando la presencia más recurrente y prolongada de efectos climáticos extremos sobre la región latinoamericana y del Caribe, como lo es el fenómeno ENSO en sus dos fases, y que vienen afectando proyectos que desarrolla el BID en compañía de las diferentes naciones pertenecientes a esta región, ha surgido la necesidad de contar con una plataforma que interactúe no solo de manera individual sino a nivel regional, dando soporte al manejo y gestión del recurso hídrico en la región, para poder definir estrategias y proyectos de adaptación a los cambios climáticos que se vienen presentado en el planeta, compartiendo datos, modelaciones hidrológicas y experiencias de aplicación. Como consecuencia, el BID crea la herramienta HydroBID en colaboración con el RTI, aportando un sistema integrado y cuantitativo para la modelización hidrológica y gestión de recursos hídricos en la gestión de América Latina y el Caribe bajo escenarios de cambio, como el clima, uso de suelo o cambio poblacional (SPOC HydroBID, 2019).

Esta herramienta integra un modelo de lluvia – escorrentía y una base de datos hidrográfica denominada LAC-AHD, que se integra en el software QGIS, el cual es un sistema de información geográfica de acceso libre, donde se puede observar, analizar, delimitar y gestionar diferentes cuencas de América Latina y el Caribe representadas de manera geoespacial.

En la Figura 5 se representa la base de datos de la región de América del sur suministrada por el BID, con la cual se gestionó la cuenca del río Coello.

De manera general, esta base de datos de América del sur cuenta con 193.000 cuencas y segmentos fluviales, con áreas promedio de 92 kilómetros cuadrados y tramos de segmentos fluviales de 11 kilómetros de manera aproximada. En cuanto al modelo de lluvia escorrentía, la herramienta utiliza el modelo de factor de carga de cauces generalizados, conocido por su sigla en inglés GWLF (Haith, et al, 1996), ligado a la metodología de tiempo de retardo en enrutamiento LAG-ROUTING, desarrollado por RTI. Otro de los componentes importantes del modelo HydroBID , son los datos climatológicos de la zona en estudio, como precipitación, temperatura y caudales diarios observados en un periodo de tiempo consecutivo y sin faltantes de información, los cuales deben ser suministrados por el usuario en archivos tipo CSV, y que se integran con la base de datos

definida por el BID para cada una de las cuencas parametrizadas, en el cual se encuentra información ya preestablecida de número de Curva (CN), pendientes de drenaje, tamaño de cuenca, longitud, etc.

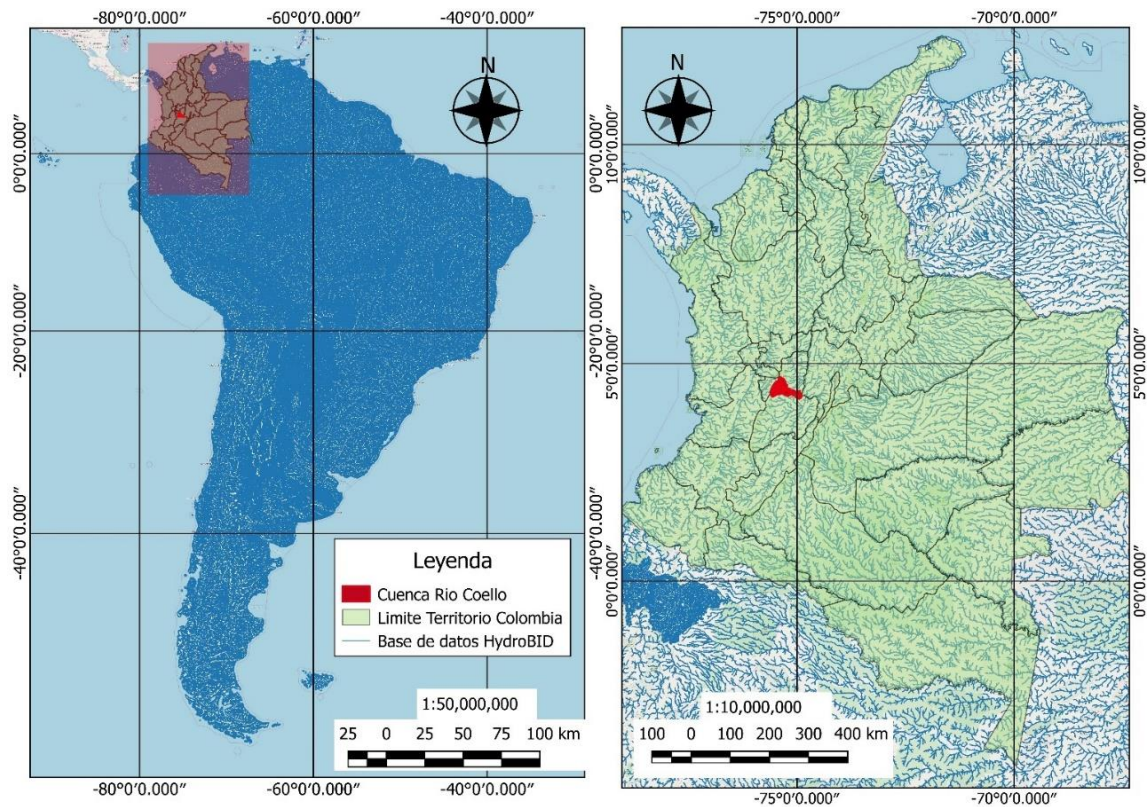


Figura 5. Visualización de la Base hidrográfica para América Latina propuesta en la base de datos LAC-AHD.

Fuente: Adaptado por Autor de LAC-AHD en QGIS

Todo lo anterior es procesado por el gestor de bases de datos SQLite, donde se puede revisar o modificar cada uno de los parámetros preestablecidos en las cuencas se pretenden estudiar.

En resumen, la herramienta HydroBID, para el desarrollo y análisis de recursos hídricos dispone de una base de datos geográfica integrada a una base de datos locales observados, los cuales mediante un modelo de lluvia – escorrentía ampliamente utilizado, provee al usuario una gran variedad de resultados para su respectivo análisis y gestión frente al comportamiento de las cuencas hidrográficas analizadas y su posible variabilidad frente a alteraciones climáticas.

1.2. Etapa 2: Recopilación y análisis de información existente en la cuenca

Para esta etapa y conforme a los requerimientos de la herramienta HydroBID, se realizó la recolección de información principal de climatología, pluviometría y de caudales sobre la cuenca en estudio, así como la obtención de mapas de usos y coberturas de suelo del territorio que cubre la cuenca con el fin de corroborar y verificar que los números de curva de cada subcuenca implícitos en la base de datos del programa estén acordes con la realidad actual del uso y tipo de suelo.

1.2.1. Información Hidroclimatológica

Para la consecución de la información hidroclimatológica, se realizó la solicitud al IDEAM de las estaciones activas y disponibles en la cuenca, requiriendo principalmente datos de temperatura media diaria, precipitación total diaria y caudales medios diarios, con los cuales se alimentó el modelo para su parametrización y posterior calibración.

En la Tabla 2 se presentan las estaciones seleccionadas para el estudio de la cuenca.

Tabla 2. Estaciones Hidroclimatológica seleccionadas.

Código IDEAM	Nombre	Categoría	Fecha instalación	Altitud	Latitud	Longitud	Corriente
21215100	Cajamarca	Climática Ordinaria	01/09/1965	1920	4,44	-75,50	Saldana
21217250	Bocatoma	Limnigráfica	15/06/1983	1509	4,46	-75,26	Quebrada Cay
21217220	San Vicente Del Combeima	Limnimétrica	15/06/1983	1750	4,54	-75,31	Combeima
21210020	Juntas Las	Pluviográfica	15/08/1971	1765	4,56	-75,32	Canal Intercept
21210130	Delicias Las	Pluviométrica	15/09/1983	295	4,38	-75,51	Cocora
21210140	Plan EL	Pluviométrica	15/09/1983	388	4,38	-75,50	Cocora
21217120	Puente Carretera	Limnigráfica	15/02/1972	1156	4,40	-75,29	Coello
21210150	Cascada La	Pluviométrica	15/09/1983	3280	4,28	-75,54	Guaroco
21217200	Carmen EL	Limnigráfica	15/07/1979	821	4,30	-75,21	Coello
21217070	Payande	Limnigráfica	15/08/1959	562	4,30	-75,09	Coello
21210170	Palogrande Hacienda	Pluviométrica	15/11/1986	2212	4,33	-75,40	Meta
21210200	Buenos Aires	Pluviométrica	15/12/1986	728	4,34	-75,07	Lejos
21217140	Puente Luisa	Limnimétrica	15/03/1985	2205	4,34	-75,52	Anaime
21215130	Cucuana Hacienda	Climática Ordinaria	15/11/1986	2229	4,34	-75,52	Anaime
21220050	Aceituno EL	Pluviométrica	15/01/1969	680	4,35	-75,05	Upia

De igual manera, en la Figura 6 se presenta la ubicación de las estaciones en la cuenca del río Coello.

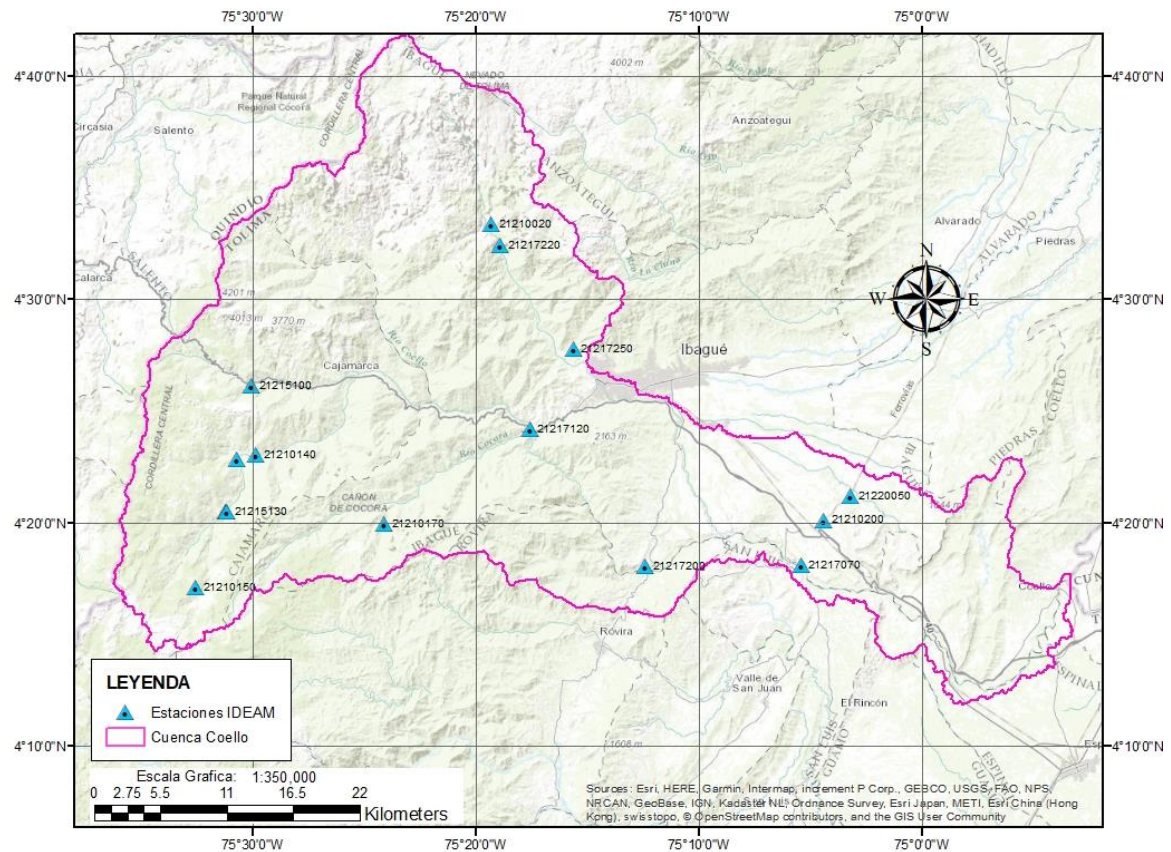


Figura 6. Localización de las estaciones hidroclimatológicas en la cuenca del río Coello.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 2, se obtuvo información de caudales diarios de 6 estaciones limnimétricas y limnigráficas, y datos de precipitación diaria de 9 estaciones de las cuales 7 son pluviométricas y 2 climatológicas ordinarias, de donde también se extrajo la información de temperatura media para la cuenca.

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de la herramienta se requería contar con un periodo o serie histórica igual para todas las estaciones, fue necesario revisar y analizar cada una de las estaciones existentes con el fin de contar con un periodo de tiempo constante y datos completos. De lo anterior, se adoptó una serie entre el 01 de enero de 1995 y 31 de diciembre de 2015, correspondiente a 20 años de datos diarios.

Es claro que las estaciones seleccionadas cuentan con un número de datos mayores como se evidencia en la Tabla 2, iniciando sus series en las décadas de los años 60, 70 y 80. Sin embargo, debido a que algunas estaciones presentan un gran número de datos de años faltantes e incompletos, particularmente al inicio de su operación, se optó por tomar las dos últimas décadas registradas para la realización de la modelación.

De igual manera, en las dos décadas seleccionadas en las estaciones se evidenciaron algunos datos faltantes, por lo cual fue necesaria la complementación de las series adoptando la metodología de media aritmética para las estaciones con porcentajes inferiores al 10% de datos faltantes, y realizando correlaciones entre estaciones con un número mayor de datos faltantes y estaciones con series mayormente completas, debido a que la herramienta HydroBID no permite series de datos incompletas para la realización de las modelaciones.

Considerando los regímenes estacionales de precipitación, temperatura y caudal que se presentan en las estaciones de la cuenca del río Coello, se procedió, tanto para la complementación de datos con la media aritmética como para las ecuaciones de correlación de estaciones, realizarlas de manera mensual con toda la serie histórica de los 20 años de análisis.

El método de correlación o regresión lineal consiste en establecer una regresión lineal con una estación base con datos sólidos mediante una ecuación lineal expresada de la ecuación 1:

$$y = a + bx \text{ [1]}$$

Dónde:

- y: Precipitación o Caudal Estimado.
- x: Precipitación o caudal de estación base
- a y b: Constantes de regresión

La correlación hidrológica de las estaciones se considera aceptable si los valores del coeficiente de correlación lineal se encuentran entre $-0,8 \leq R \leq 0,80$ (Pizarro et al, 1993).

Al mismo tiempo, se consideró relevante verificar la confiabilidad y homogeneidad de los registros seleccionados entre el año 1995 y el año 2015, por lo que se analizaron diferentes estaciones con el método de Doble Masas (Montealegre,1990). Este método consiste en analizar gráficamente la serie de datos de una estación con otra cercana, construyendo un diagrama cartesiano; si los puntos tienen una tendencia lineal, los datos son válidos y no requiere correcciones, por el contrario, cuando se presentan cambios de pendientes fuertes, es necesario realizar el ajuste, proporcionando la constante K que, multiplicada por los

valores inconsistentes de las estaciones analizadas, permite el ajuste y corrección de estos.

Es importante precisar que el criterio para afirmar que el modelo lineal se considera adecuado y aceptable, es aquel donde el valor del coeficiente de determinación lineal (R^2) se aproxima a 1, que indica un ajuste lineal perfecto.

Una vez completada y revisada la homogeneidad de las series históricas de cada una de las estaciones tanto de precipitación, temperatura y caudales, se procedió a generar los archivos tipo CSV para cargar en la base de datos de HydroBID y proceder con la construcción y desarrollo del modelo.

1.2.2. Información de uso del suelo

Como parte de la base de datos que proporciona HydroBID, se cuenta con una caracterización de la cobertura del suelo de la región, con los que se definieron los números de curva para cada una de las subcuencas, basados en los tipos de suelo y grupo hidrológico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, su sigla en inglés) ; complementada con información de cobertura de suelo obtenida del USGS y los datos del suelo para la clasificación hidrológica adaptados de la base de datos mundial de suelos (HWSD, su sigla en inglés), (SPOC HYDROBID, 2019)

Lo anterior, permite tener una aproximación bastante acertada del parámetro de número de curva para las respectivas modelaciones de caudales; sin embargo, se realizó una revisión general de los números de curva propuestos por el programa HydroBID con base en los mapas de uso de cobertura de tierras definidos por el IGAC (Figura 4), con el fin de contar con una respuesta más acertada de la modelación al momento de la calibración de la cuenca en estudio.

1.3. Etapa 3: Construcción y Parametrización del modelo HydroBID

1.3.1. Construcción del modelo

Como se mencionó en etapas anteriores, el modelo HydroBID requiere de la introducción de datos climáticos en formato CVS ordenados de manera particular en subcarpetas dentro de la carpeta principal de la herramienta, para lo cual se organizaron las estaciones con

datos pluviométricos, de temperatura y caudales como se muestra en la Figura 7, los cuales fueron identificados o nombrados con los códigos de la estación definidos por el IDEAM y presentados en la Tabla 2. Cada uno de estos archivos contiene el registro diario de cada parámetro entre el 1 de enero de 1995 y 31 de diciembre de 2015. Un ejemplo del contenido de los archivos se presenta en la Figura 8 y Figura 9.

Cada archivo contiene un total de 7670 registros de parámetros diarios, como la precipitación diaria en centímetros, la temperatura diaria en grados centígrados (°C) y los caudales diarios registrados en metros cúbicos por segundo (m³/s).

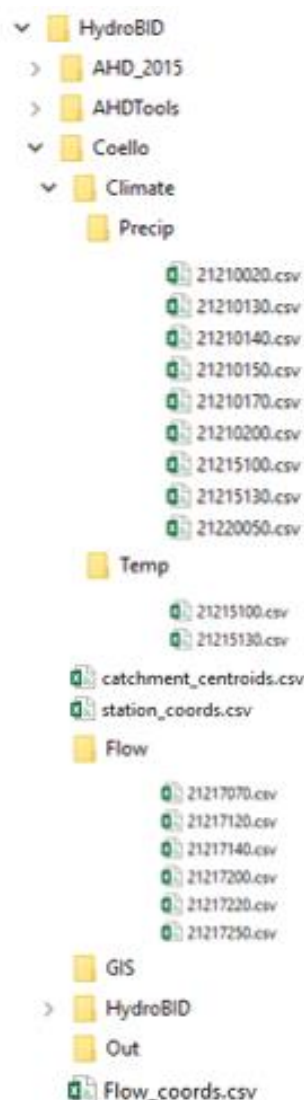


Figura 7. Construcción de Base de datos para HydroBID.

date,precip(cm)
1/01/1995,0.00
2/01/1995,0.00
3/01/1995,0.00
4/01/1995,0.12
5/01/1995,0.00
6/01/1995,0.00
7/01/1995,0.00
8/01/1995,0.00
9/01/1995,1.25
10/01/1995,0.50
11/01/1995,0.00
12/01/1995,0.00

Figura 8. Organización de los registros climatológicos para la base de datos.

date,flow(m3/s)
1/01/1995,17.3
2/01/1995,17.3
3/01/1995,17.3
4/01/1995,16.83
5/01/1995,17
6/01/1995,16.47
7/01/1995,16.13
8/01/1995,16.13
9/01/1995,16.13
10/01/1995,16.13
11/01/1995,16.13
12/01/1995,15.77

Figura 9. Organización de los registros de caudales para la base de datos

Adicional a los archivos hidroclimatológicos, se crearon archivos con las coordenadas de las estaciones utilizadas en el estudio y las coordenadas de los centroides de cada una de las subcuencas que conforman la cuenca total del río Coello, realizado con ayuda del software QGIS y la base de datos LAC-AHD, como se presenta en la Figura 10.

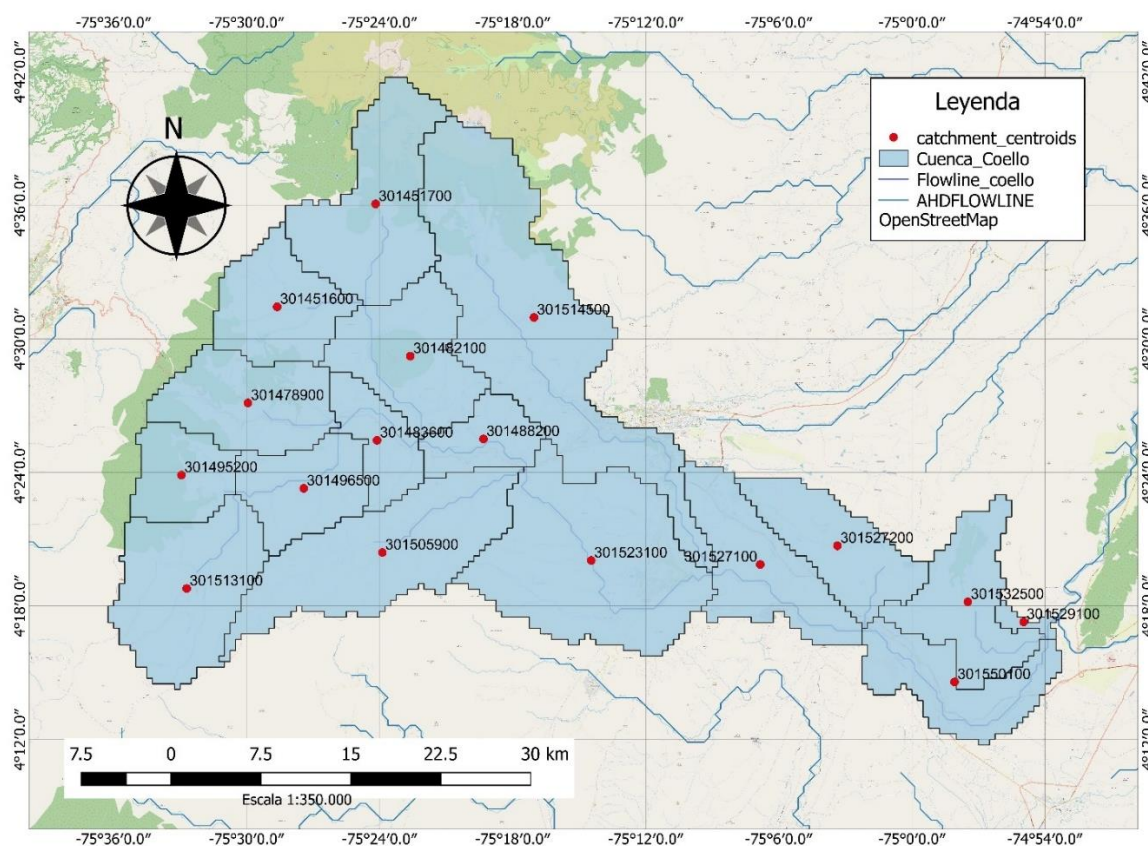


Figura 10. División e identificación de subcuencas del río Coello con la base de datos LAC-AHD.

La base geográfica LAC-AHD, cuenta con una división de la cuenca del río Coello de 17

subcuencas, cada una codificada con una numeración particular en un campo denominado COMID, el cual servirá al momento de la modelación para calcular o definir los caudales del río en una cuenca específica.

Posteriormente, se creó la carpeta OUT, donde se almacenarán todos los resultados o modelaciones realizadas en la herramienta.

Una vez definidas las carpetas y bases de datos requeridas por la herramienta, es necesario realizar la interpolación de los datos construidos y organizados de precipitación y temperatura a nivel de subcuencas, particularmente a las observadas en la Figura 10, para lo cual se utilizó la herramienta incluida en HydroBID denominada *Climate Data Interpolating Tool*, y cuya interfaz se presenta en la Figura 11.

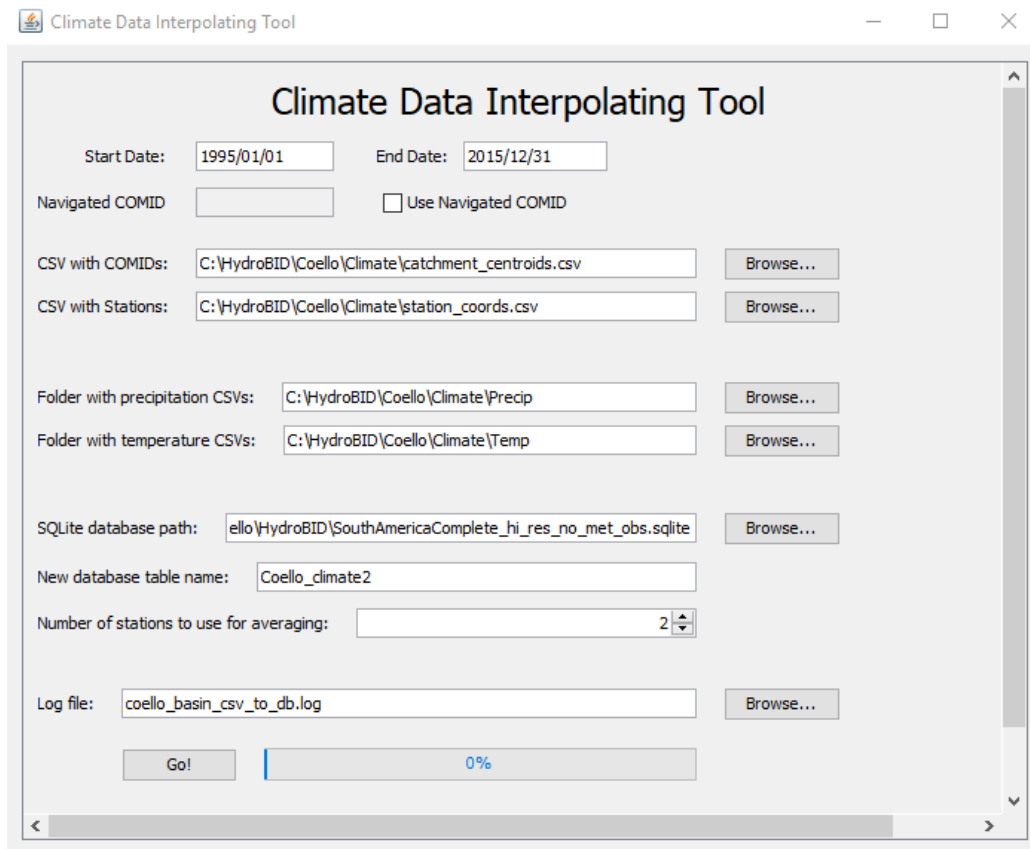
The image shows a software window titled "Climate Data Interpolating Tool". The interface includes several input fields and buttons. At the top, there are "Start Date" (1995/01/01) and "End Date" (2015/12/31) fields. Below them is a "Navigated COMID" field and a checkbox labeled "Use Navigated COMID". Further down, there are two rows for CSV files: "CSV with COMIDs" (C:\HydroBID\Coello\Climate\catchment_centroids.csv) and "CSV with Stations" (C:\HydroBID\Coello\Climate\station_coords.csv), each with a "Browse..." button. Next are "Folder with precipitation CSVs" (C:\HydroBID\Coello\Climate\Precip) and "Folder with temperature CSVs" (C:\HydroBID\Coello\Climate\Temp), also with "Browse..." buttons. Below these is the "SQLite database path" (ello\HydroBID\SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite) with a "Browse..." button. A "New database table name" field contains "Coello_climate2". A "Number of stations to use for averaging" field is set to "2" with a spinner. At the bottom, there is a "Log file" field (coello_basin_csv_to_db.log) with a "Browse..." button. A "Go!" button is located at the bottom left, and a progress bar at the bottom center shows "0%".

Figura 11. Interfaz Climate Data Interpolating Tool HydroBID.

Este Algoritmo desarrolla la interpolación mediante la vinculación de los archivos de centroides de cuencas, ubicación de las estaciones y los demás datos climatológicos incluidos en la base de datos, con el fin de que cada subcuenca cuente con datos de

temperatura y precipitación particulares, para el posterior cálculo de caudales.

Paso seguido, se definen datos básicos requeridos por la herramienta para su funcionamiento, los cuales se guardarán en un archivo denominado “settings.txt”, desde el nombre que llevará la modelación, el numero o nombre de la cuenca a analizar, fechas de inicio y fin de la modelación; que deben ser concordantes con las fechas de los registros históricos almacenados en la base de datos, ubicación de base de datos, hasta la carpeta de salida de resultados.

A continuación, en la Figura 12 se presenta la interfaz inicial de la herramienta HydroBID, donde se realizó el ingreso de los datos iniciales para la ejecución del modelo.

The screenshot shows the 'HydroBID II' application window with a 'Setup' tab selected. The window contains several sections for configuring the model setup:

- Setup Options:** Includes fields for 'Run Name' (Cuenca_coello), 'Catchment' (301527100), 'Start date (dd/mm/yyyy)' (01/01/1995), and 'End date (dd/mm/yyyy)' (31/12/2015).
- Database File Options:** Includes 'DB Location' (C:\HydroBID\Coello\HydroBID\SouthAmericaComplete_hi_res_no_met_obs.sqlite) and 'DB Met Data Table' (Coello_climate2).
- Climate Data File Options:** Includes 'Climate Data' and 'Climate Scenario' fields.
- Watershed File Options:** Includes 'Flows to compare' (C:\HydroBID\Coello\Flow\21217070.csv) and 'Cutoff Files Folder'.
- Output File Options:** Includes 'Reservoir Dir' and 'Output Dir' (C:\HydroBID\Coello\Out).

At the bottom, there are radio buttons for 'Output' with 'Outlet catchment' selected and 'All catchments' as an option.

Figura 12. Interfaz de inicio Setup HydroBID.

1.3.2. Parametrización del modelo

EL modelo HydroBID requiere para su correcto desarrollo la definición de ciertos parámetros hidrológicos e hidráulicos, como la velocidad de la corriente, la latitud, el inicio y final de la temporada de cultivos, así como los parámetros referentes a las

condiciones de suelo, como el CN, contenido de agua, permeabilidad, entre otros. De los parámetros anteriores, algunos son referenciados por defecto en el modelo y otros deben ser incluidos de acuerdo con el conocimiento particular de la zona en estudio. En la Figura 13 se presenta la interfaz para la parametrización del modelo HydroBID.

Hydro Model Parameters:

Stream velocity (m/s): ☒ Get Latitude from Database

Latitude (degrees): ☐ Save Deep Seepage

Start of growing season (day of year):

End of growing season (day of year):

Calibration Cutoff COMID:

	Single Value	Multiplier	Use Calibrated	Replace All	
Curve Number:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
AWC:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
R Coefficient:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="0.01"/>
Seepage:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text" value="0.005"/>
Grow season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Dormant season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/>
Impervious cover percent:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="2"/>

Figura 13. Interfaz de parametrización HydroBID.

De los parámetros anteriores, la velocidad y los relativos a la capacidad hidrológica del suelo que se expondrán en el siguiente numeral, son asumidos por defecto en la herramienta y posteriormente se utilizaran para la calibración del modelo; para el caso de los días de inicio y fin de cultivos en la cuenca, se propone un número de días cercano a la totalidad de días del año, ya que en la cuenca de estudio se presentan cultivos permanentes, y que por las condiciones climáticas de la misma se pueden mantener prácticamente todos los días del año.

1.4. Etapa 4: Desarrollo y Calibración del modelo HydroBID

Una vez realizadas las anteriores etapas, la herramienta ya se encuentra lista para el desarrollo del modelo; sin embargo, para la posterior calibración de la modelación es necesario considerar los valores definidos por defecto y que se presentan en la Figura 13, particularmente los parámetros que se mencionan en la Tabla 3.

Estos parámetros pueden ser utilizados o propuestos como un valor simple o como un factor multiplicador del mismo, por defecto que trae la herramienta ya predeterminado. Para la calibración del modelo de la cuenca del río Coello, se utilizó un factor multiplicador para el CN y el AWC; para los parámetros restantes se utilizó un valor simple partiendo del valor por defecto proporcionado por el modelo.

Tabla 3. Parámetros para la calibración del Modelo.

Parámetro	Definición	Valor por Defecto
CN	Numero de curva	1
AWC	Representa el contenido de agua disponible	1
R Coefficient	Coeficiente de recesión	0,01
Seepage	Permeabilidad, representa el coeficiente de permeabilidad para determinar la infiltración profunda desde la capa saturada	0,005
Grow season ET Factor	Factor de evapotranspiración de la estación de cultivo	1
Dormant season ET Factor	Factor de evapotranspiración de la estación de latencia (sin cultivo)	1
Impervious cover percent	Porcentaje de cobertura impermeable	1

De igual manera, se realizó la comprobación de los números de curva previo a la modelación con base en las coberturas de tierra propuestas en la Figura 4, los cuales son bastante próximos a los definidos previamente en la base de datos de HydroBID, por lo que se decidió mantener los valores por defecto y realizar las calibraciones necesarias para el ajuste del modelo.

1.4.1. Calibración modelo HydroBID

Para la calibración de la herramienta, se procedió a realizar la modelación de la cuenca número 301527100, correspondiente a la estación Payande, siendo esta la estación de caudales más próxima al punto final de salida de la cuenca total del río Coello, como se aprecia en la Figura 10. Como resultados de la primera modelación se obtuvieron los parámetros estadísticos iniciales de error y correlación, entre la información calculada por la herramienta y la tomada de la serie de datos históricos. Estos parámetros, al igual que las gráficas que arroja la herramienta de duración de caudales y caudales multianuales, juegan

un papel importante para la calibración del modelo, ya que el objetivo es lograr la mayor similitud de las gráficas entre valores observados y calculados, así como conseguir unos parámetros estadísticos ajustados a ciertos rangos o criterios con los que se pueda determinar que un modelo se encuentra adecuadamente calibrado, dichos rangos se relacionan en la Tabla 4. (SPOC HydroBID, 2019).

Tabla 4. Rangos de Parámetros estadísticos para calibración del Modelo.

Fuente: Adaptado de SPOC HydroBID, 2019

Parámetro Estadístico	Valor adecuado en un modelo calibrado
Volumen de Error (Overall volume error)	-+/- (20-30 ó 30-40)
Numero de Correlación (Correlation, r(-))	Lo más cerca de 1 posible
Correlación del Modelo (Modified Correlation, Rmod)	Lo más cerca de 1 posible
Nash-Sutcliffe Efficiency, R ²	Cercano a 0,40 ó 0,6

Después de realizar diferentes ejecuciones de la herramienta, efectuando variaciones de los parámetros hidráulicos como el AWC, el Coeficiente R y el Seepage, se logró obtener mínimos volúmenes de error y aproximación de los coeficientes de correlación lo más cercanos a 1, siempre verificando que la curva de duración de caudales, al igual que la gráfica de registros multianuales, tuvieran la mejor correlación, especialmente en los caudales máximos y mínimos.

De manera particular, para la cuenca del río Coello, el modelo inicial arrojó una deficiencia en los caudales calculados, siendo estos marcadamente menores a los observados en la estación Payande, por lo cual se procedió a modificar el coeficiente de permeabilidad Seepage, disminuyéndolo para reducir la infiltración y aumentar la escorrentía en la cuenca. Posteriormente, se realizó un aumento del coeficiente de recesión para aumentar la repetitividad de los caudales altos y reducir los caudales mínimos.

Finalmente, se realizaron varias iteraciones modificando el parámetro de contenido de agua disponible en el suelo AWC, con el fin de ajustar lo más posible la curva de caudales calculados con los observados, y mejorar los parámetros estadísticos.

Una vez realizado el proceso anterior, se consideró un modelo adecuadamente calibrado, y se procedió a obtener los resultados de volúmenes de flujo y balance hídrico de la cuenca,

así como las demás modelaciones con la variación de cambio climático.

1.5. Etapa 5: Variación de Parámetros por Cambio climático

Para el proceso de variación de cambio climático, se dispone de un apartado dentro de la herramienta denominado “Climate Scenario”, en esta aplicación se pueden realizar variaciones totales o mensuales de precipitación y temperatura tanto en valores reales como en factores multiplicadores.

En la Figura 14 se presenta la interfaz de la herramienta para la modificación de los parámetros climáticos.

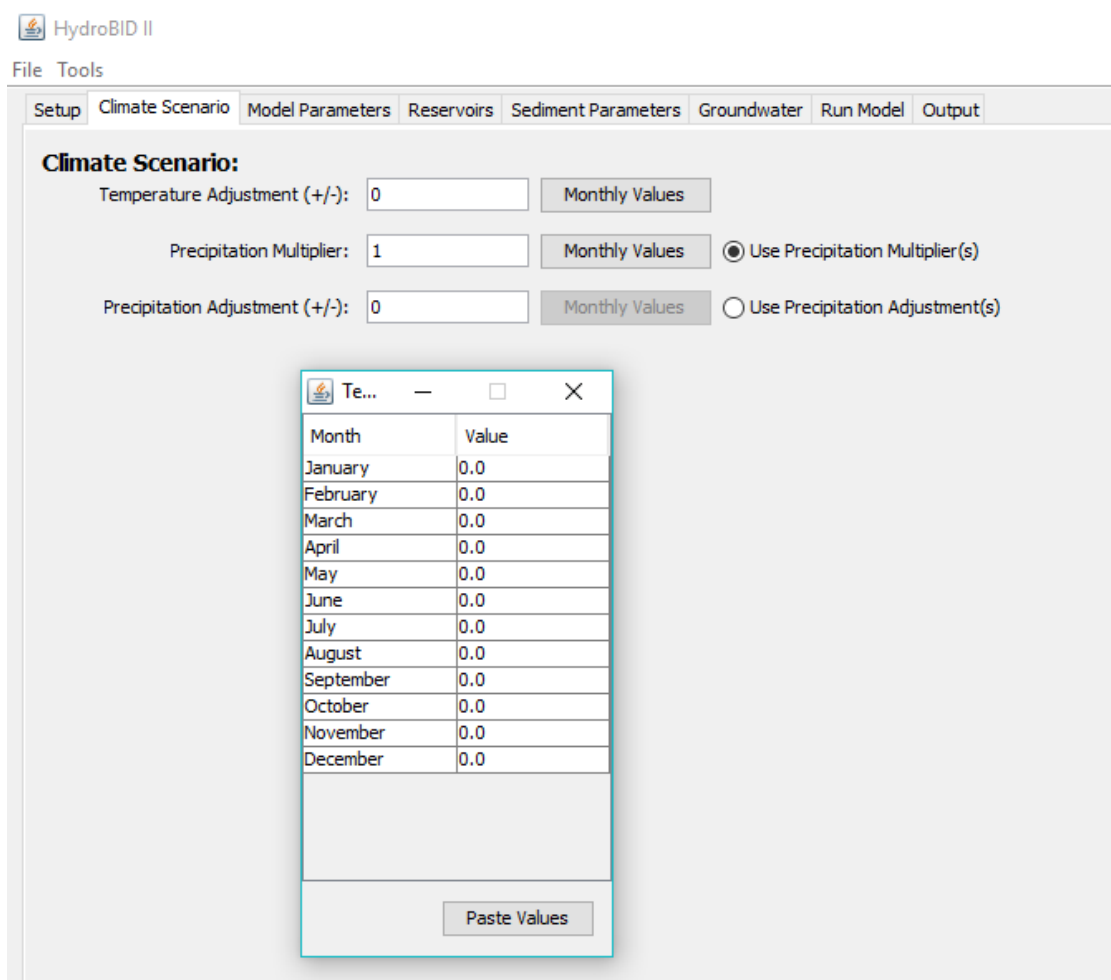


Figura 14. Interfaz de escenarios climáticos HYDRO_BID

Con esta herramienta se procedió a realizar una modelación de variación de temperatura y precipitación con el fin de considerar los efectos sobre los caudales de la cuenca en el futuro inmediato; verificando los análisis y escenarios evaluados por el IPCC, donde se

tienen proyecciones de aumento de temperatura media global en la superficie terrestre para el periodo entre el 2016 y 2035 en un rango de $0,3^{\circ}\text{C}$ a $0,7^{\circ}\text{C}$, y para el periodo entre los años 2081 y 2100, incrementos cercanos a los 2°C (IPCC, 2014). Por lo anterior, para el presente trabajo, se optó por realizar un incremento general de la temperatura en la cuenca de 2°C para los próximos 30 años. De igual manera, se tiene previsto que, para zonas de latitud media y regiones tropicales, la precipitación presente variaciones alrededor de 10 al 20% (Figura 15).

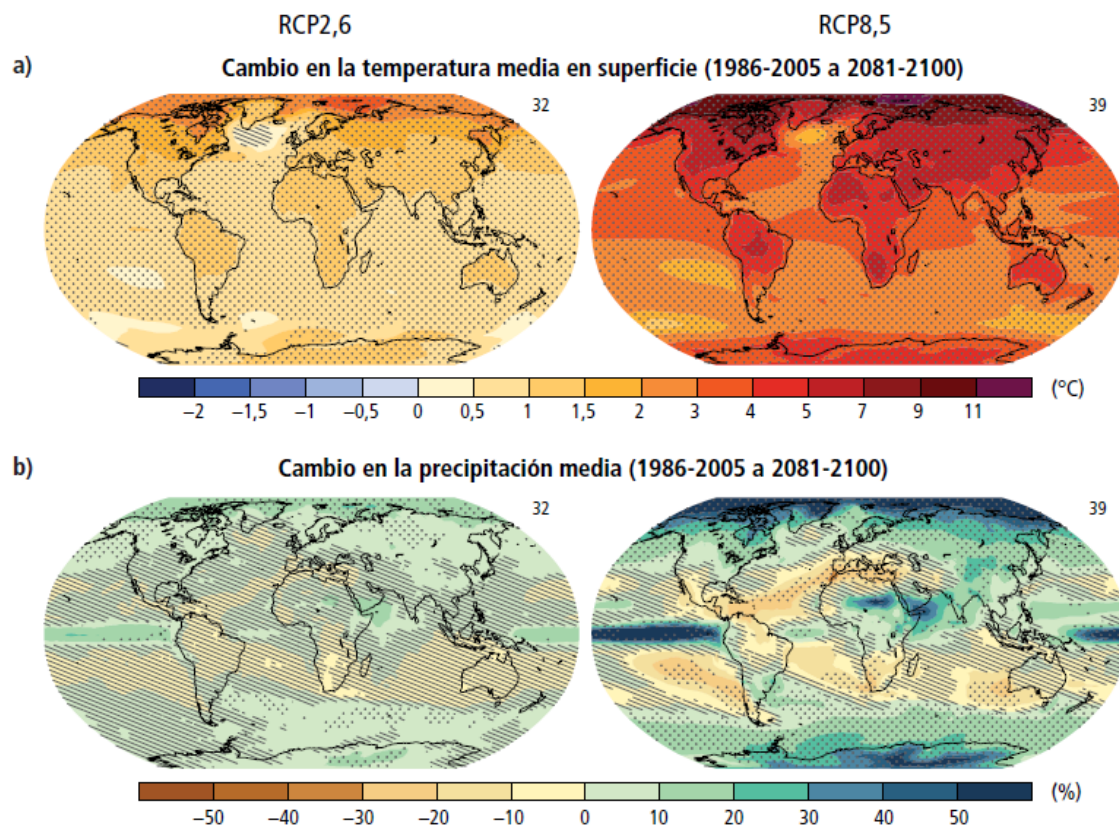


Figura 15. Proyecciones medias de cambio de temperatura y precipitación Global

Fuente: Adaptado de IPCC, 2014, Figura 2.2)

Teniendo en cuenta los posibles efectos del ENSO en la región ecuatorial y directamente sobre la cuenca del río Coello, se adoptaron como escenarios de estudio en el modelo HydroBID, un incremento del 20% de la precipitación media actual sumado a la variación de temperatura anteriormente descrita, así como también un descenso en la precipitación del 20% manteniendo el incremento de la temperatura media, para los próximos 30 años.

Una vez desarrolladas las 5 etapas propuestas para la caracterización hidrográfica de la cuenca del río Coello, se obtuvieron y discutieron los resultados tanto de la modelación con

los datos actuales, como los escenarios propuestos para el cambio climático.

2. RESULTADOS

Conforme a la metodología propuesta, a continuación, se relacionan los resultados obtenidos en las diferentes etapas, iniciando con la complementación y verificación de homogeneidad de los datos históricos recolectados de las diferentes estaciones, terminando con las diferentes modelaciones para cambio climático en la cuenca.

2.1. Tratamiento de datos hidrológicos

Organizada la información hidroclimatológica de las estaciones seleccionadas en el periodo indicado entre el 1 de enero de 1995 y el 31 de diciembre de 2015, se verificó la cantidad de datos faltantes, de los cuales se obtuvo como resultado que, de las 9 estaciones de precipitación 5 contaban con datos faltantes menores al 10% e inclusive algunas de estas con datos faltantes menores al 5%, por lo que se complementaron con el promedio aritmético mensual de cada estación con el fin de no afectar la estacionalidad climática de la zona. Las 4 estaciones restantes, se complementaron definiendo la ecuación de correlación principalmente con la estación Cucuana y las Delicias que presentaron la menor cantidad de datos faltantes y en comparación con las demás estaciones tenían una mejor correlación con valores de R^2 por encima del 0,3.

De la misma manera, para las 6 estaciones de caudales presentes en la cuenca, se realizó la complementación aritmética de 3 de ellas con porcentajes inferiores al 10% en datos faltantes, y las otras 3 estaciones se correlacionaron con la estación El Carmen que mostró el mejor ajuste con valores de R^2 por encima del 0,50.

En las Figura 16 y Figura 17, se presentan las gráficas de correlación típicas para la serie del mes de octubre, tanto para precipitación como para caudales de la cuenca estudiada.

Una vez complementados los datos de cada estación, se aplicó la metodología de Doble Masas propuesta, graficando la serie de datos diarios acumulados de precipitación y caudales de algunas de las estaciones de la cuenca (Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23).

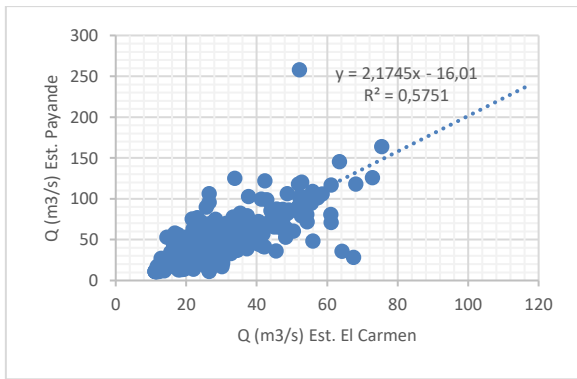


Figura 16. Correlación Estación de Caudales Payande – Estación de Caudales El Carmen.

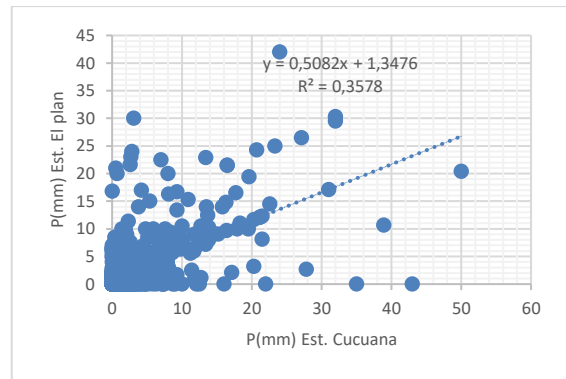


Figura 17. Correlación Estación Pluviométrica El Plan – Estación Pluviométrica Cucuana.

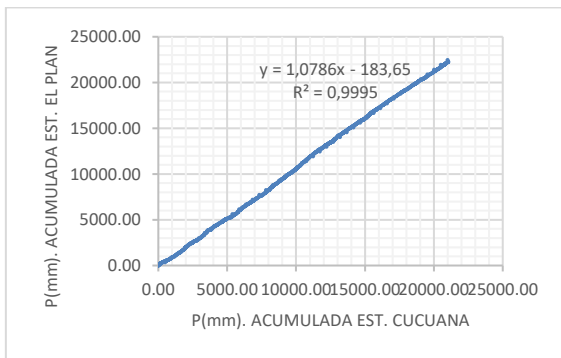


Figura 18. Grafica de Doble Masas para la Estación El Plan - Estación Cucuana.

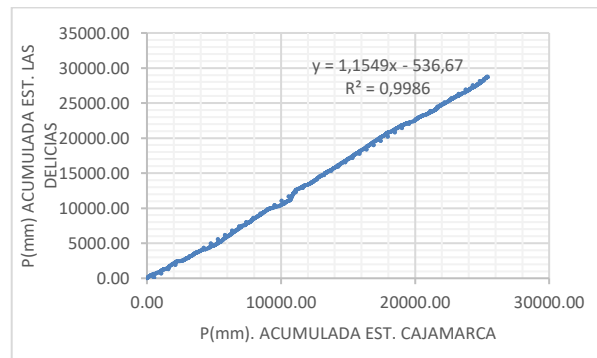


Figura 19. Grafica de Doble Masas para la Estación Las Delicias - Estación Cajamarca.

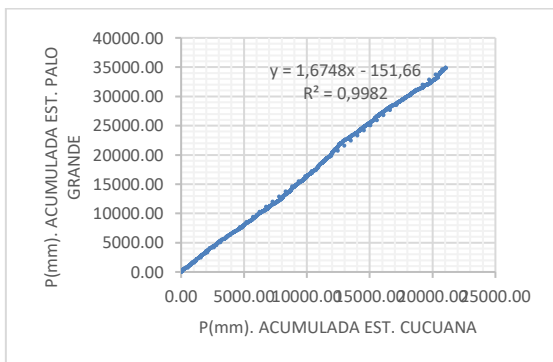


Figura 20. Grafica de Doble Masas para la Estación. Palogrande - Estación Cucuana.

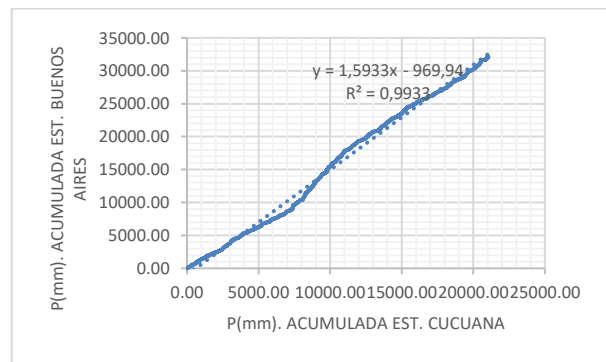


Figura 21. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Cucuana.

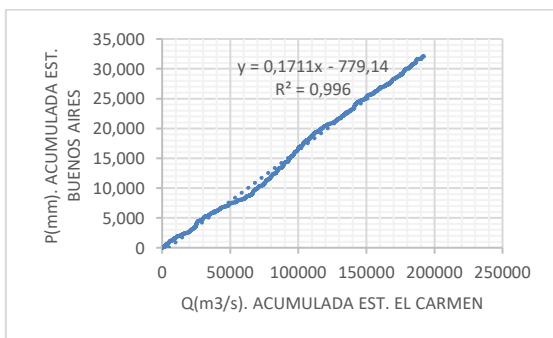


Figura 22. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación El Carmen.

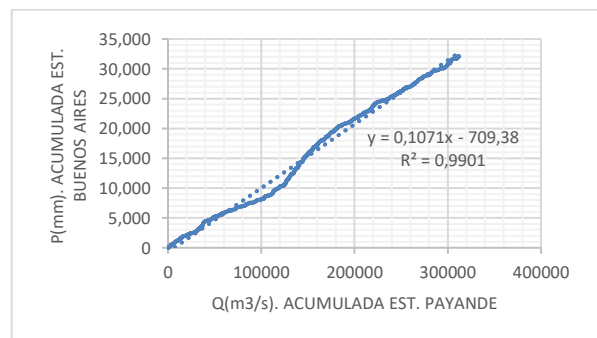


Figura 23. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Payande.

De acuerdo con los resultados de la metodología aplicada, se puede evidenciar que las series históricas de las estaciones de la cuenca son homogéneas y confiables para su utilización en la modelación con HydroBID.

En el caso de los datos de temperatura media diaria obtenidos, algunos estaban incompletos, los cuales fueron igualmente complementados con la media aritmética de la serie de cada mes considerando que la variación media mensual e incluso anual en cada estación es mínima, ya que, como se sabe el territorio colombiano está influenciado por los climas ecuatoriales, particularmente la región Andina colombiana tiene la presencia de los llamados Pisos Térmicos, donde a menor altura sobre el nivel de mar la temperatura del aire aumenta y a medida que el nivel aumenta la temperatura del aire disminuye (IDEAM, 2017). Lo anterior hace que las temperaturas medidas en las estaciones sean prácticamente constantes como se presenta en la Figura 24 de la serie histórica de la estación Cucuana.

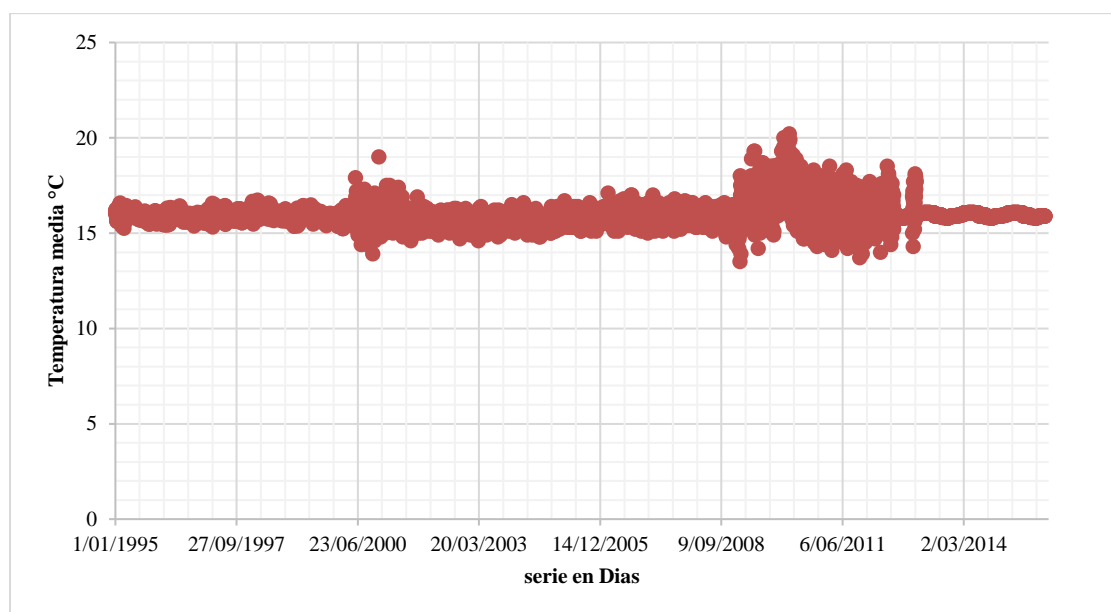


Figura 24. Serie histórica de temperatura media para la estación Cucuana.

2.2. Desarrollo y Calibración del Modelo HydroBID

Surtidas las etapas de complementación hidrológica, construcción de archivos y parametrización de datos requeridos por la herramienta, se realizó la primera ejecución del modelo hasta la estación de caudales Payande, donde se obtuvieron los parámetros estadísticos de la Tabla 5 en respuesta a la simulación inicial de caudales de la herramienta

con respecto a los observados o registrados en la estación entre los años 1995 y 2015.

Tabla 5. Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial en HYDROBID.

Parámetro Estadístico	Valor obtenido
Overall volume error	-44,85
Correlation, r(-)	0,35
Modified Correlation, Rmod	0,11
Nash-Sutcliffe Efficiency, R^2	-0,13

Como se mencionó en la metodología, es esencial contar con la respuesta grafica de la herramienta para validar la calibración mediante la comparación de las gráficas de caudales modelados respecto a los observados y su respectiva curva de duración. A continuación, en las Figura 25 y Figura 26 se expone lo mencionado.

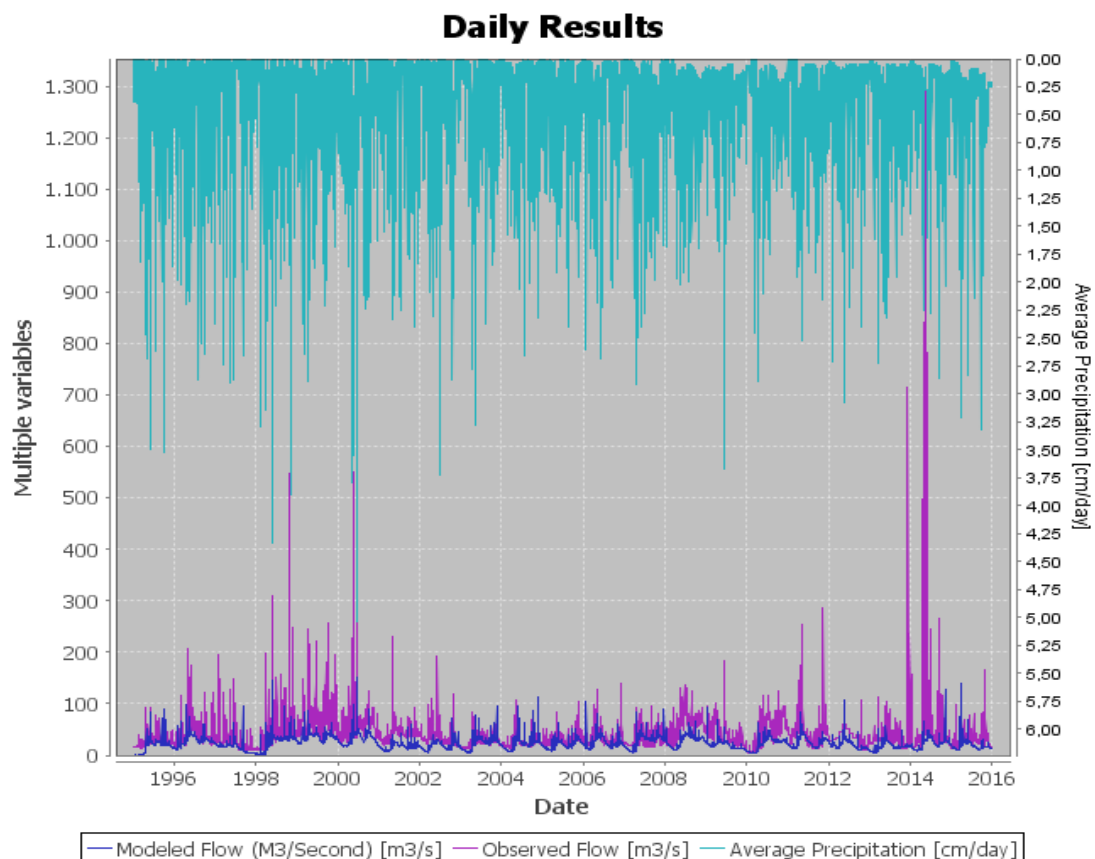


Figura 25. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados

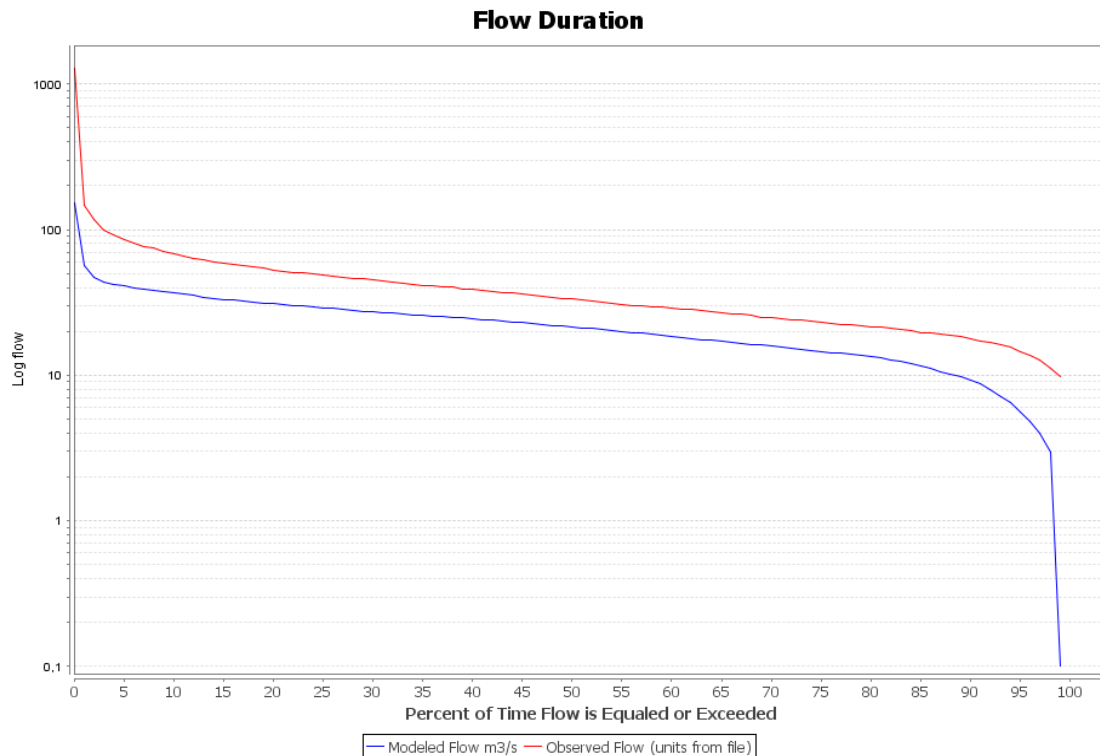


Figura 26. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados

El objetivo de la calibración, además de contar con parámetros estadísticos aceptables dentro de los rangos propuesto sin pretender llevar el error a 0 o tener un perfecto empate entre las curvas, es tener una similitud coherente y responsable entre los caudales observados y los caudales modelados, con el fin de poder realizar modelaciones en otros puntos de la cuenca y realizar evaluaciones de cambios climáticos en la misma con una mayor confiabilidad.

Conforme a lo anterior, se procedió a realizar los respectivos ajustes y tanteos a los parámetros hidráulicos propuestos en la Tabla 3, con el fin de contar con un mejor ajuste de las curvas de caudales y parámetros estadísticos en los rangos establecidos.

Después de múltiples iteraciones, se observó que los parámetros más relevantes o influyentes sobre la calibración del modelo, fueron el coeficiente de recesión (RC), el contenido de agua disponible (AWC) y el coeficiente de permeabilidad, con los cuales se logró mejorar principalmente las condiciones de escorrentía de los caudales modelados, logrando un mínimo en el parámetro estadístico de volumen de error, inclusive por debajo del rango mínimo recomendado en la Tabla 4, considerando este último como el decisivo para la calibración, ya que, de las diferentes iteraciones, los parámetros adicionales como

los números de correlación y correlación modificado, no superaban 0,4 y el 0,2 respectivamente.

Igualmente, es preciso mencionar que en las diferentes modelaciones para calibración, se realizó la variación del CN y de los valores de evapotranspiración y porcentajes de áreas impermeables, con el fin de obtener mayores niveles de escorrentía, sin llegar a valores notables como sí era el caso cuando se realizaron variaciones del coeficiente de permeabilidad, por lo que decidió mantener los valores por defectos establecidos por la herramienta.

A continuación, se presenta en la Tabla 6 los resultados de los parámetros hidráulicos ajustados y en la Tabla 7 los parámetros estadísticos obtenidos en la calibración.

Tabla 6. Parámetros hidráulicos definidos en calibración del Modelo.

Parámetro	Valor propuesto
CN	1
AWC	0,08
R Coefficient	0,029
Seepage	0,0005
Grow season ET Factor	1
Dormant season ET Factor	1
Impervious cover percent	1

Tabla 7. Parámetros Estadísticos de la modelación Calibrada en HYDROBID.

Parámetro Estadístico	Valor obtenido
Overall volume error	-4,48
Correlation, r(-)	0,4
Modified Correlation, Rmod	0,21
Nash-Sutcliffe Efficiency, R ²	-0,14

En la Figura 27 se presenta la correlación de los datos de caudal observados con los de caudal modelados. En la Figura 28 y Figura 29 se observa la curva obtenida de duración de caudales ya calibrados, así como el histórico de caudales modelados y observados.

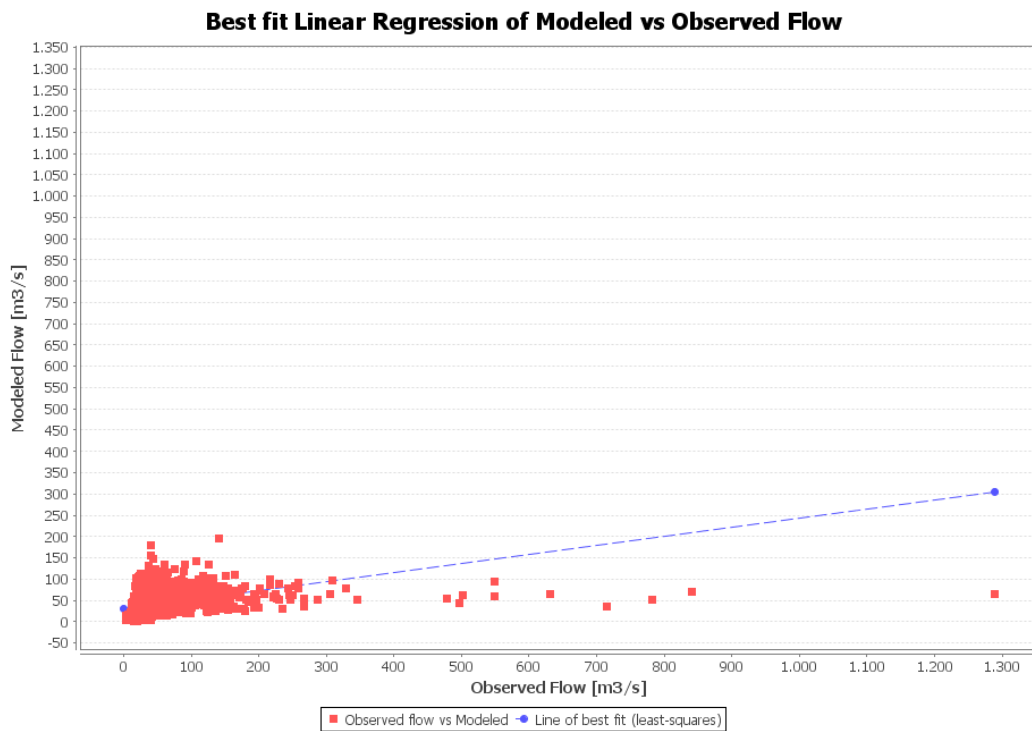


Figura 27. Correlación de Caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado

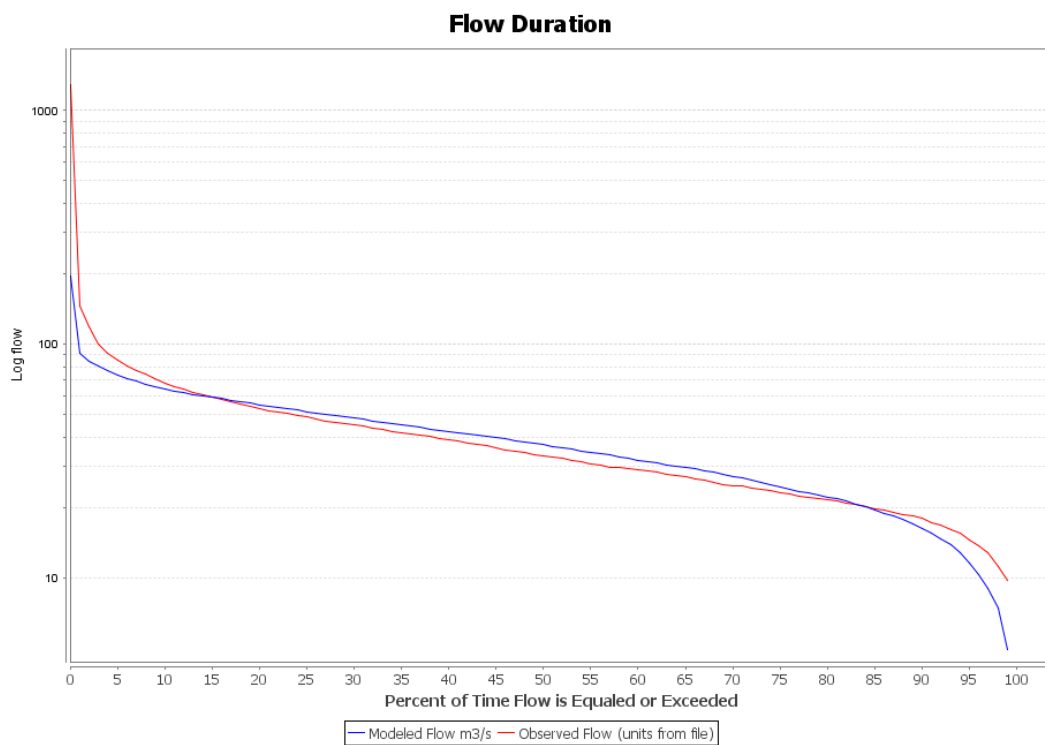


Figura 28. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado

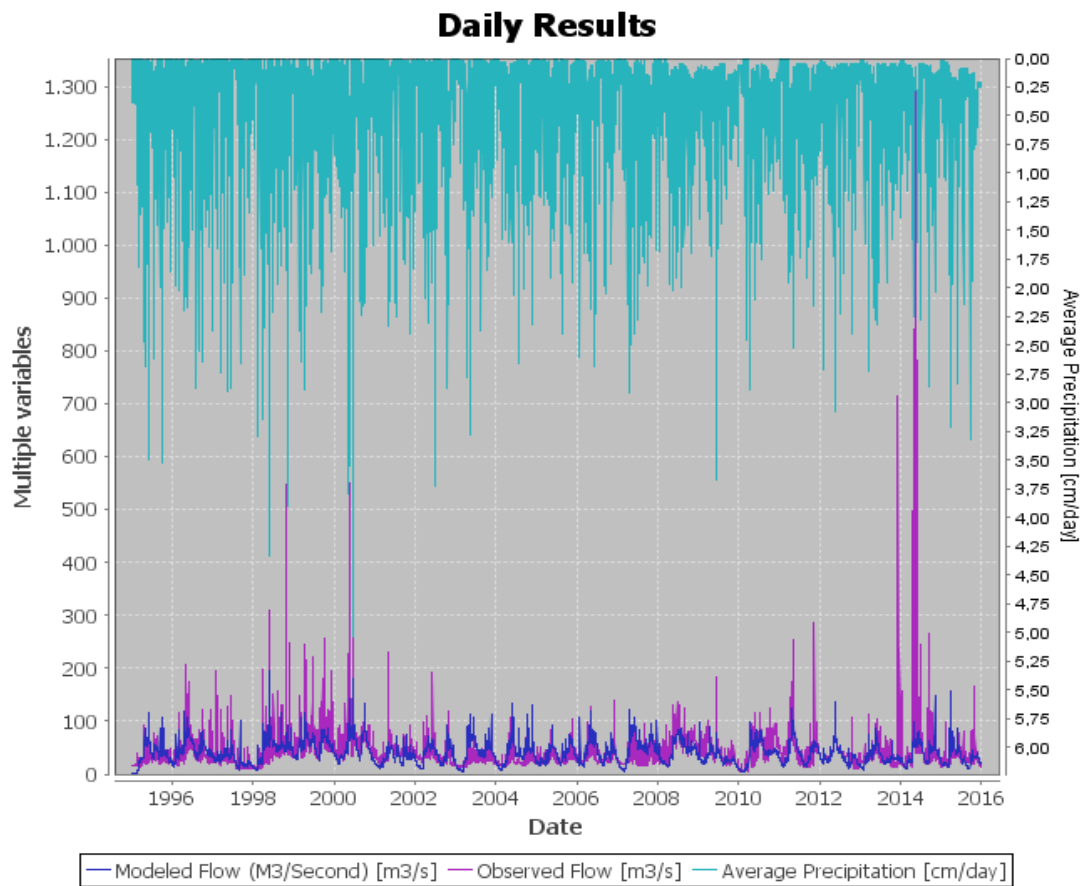


Figura 29. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados en modelo Calibrado

Una vez desarrollada la calibración del modelo, se obtuvieron los resultados de la modelación de la cuenca y se realizaron las modelaciones con pronósticos de cambio climático.

2.3. Modelo: Escenario Actual

A continuación, se exponen los resultados de la condición actual de la cuenca hasta el punto de la estación Limnigráfica Payande (21217070) con la cual se realizó la calibración del modelo.

En la Figura 30 se representan las subcuencas drenantes hasta el punto de la estación de caudales mencionada y que corresponde al balance hídrico anual propuesto en la Tabla 9.

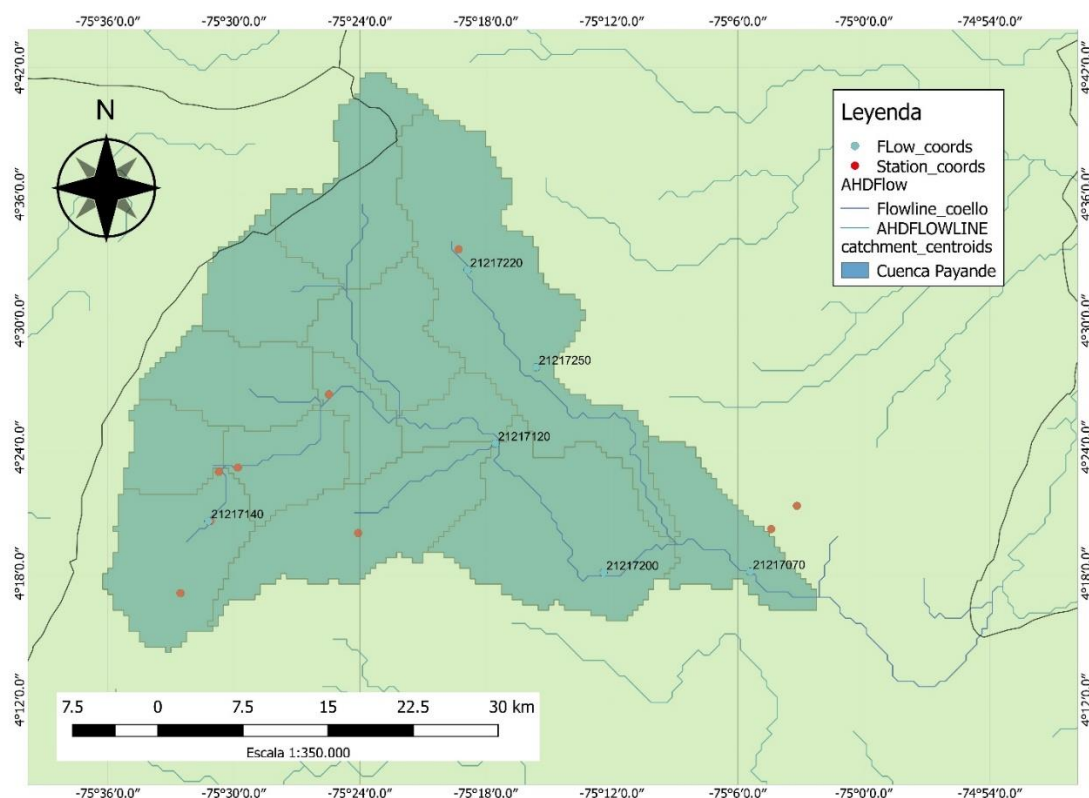


Figura 30. Delimitación de cuenca hasta la estación de caudales Payande con base de datos LAC-AHD incluyendo estaciones Hidroclimatológicas

Los balances hídricos de las Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 12 están compuestos por las siguientes columnas que resumen los parámetros resultantes del modelo HydroBID y que se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Definición de parámetros calculados en los resultados del balance hídrico calculado por HydroBID.

Parámetro	Definición
Rango de Datos	Corresponden al año o mes modelado en el cual se calculó el balance hídrico
Precipitación	Corresponde a la precipitación media anual en centímetros que se presentó sobre la cuenca de estudio
Evapotranspiración	Corresponde a la evapotranspiración media ocurrida sobre la cuenca en centímetros al año
Escurrimiento	Valor correspondiente a la escurrimiento media en centímetros al año sobre la cuenca estudiada
Volumen de agua subterránea al cauce	Corresponde al volumen de agua subterránea que ingresa al cauce en centímetros anuales
Flujo Total	Corresponde al flujo o caudal total a la salida de la cuenca estudiada en millones de metros cúbicos al año
% almacenamiento no saturado	Corresponde al porcentaje de almacenamiento en la zona no saturada
% almacenamiento saturado	Corresponde al porcentaje de almacenamiento en la zona saturada
Contribución red de Agua Subterránea	Corresponde a la contribución de la red de agua subterránea en la cuenca.
Recarga	Corresponde al valor de recarga en el acuífero en centímetros
Volumen de Error en Balance	Corresponde al volumen de error del balance hídrico calculado en porcentaje

Tabla 9. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello hasta la estación Payande.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escoorrentía (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almacenamiento no saturado	% almacenamiento saturado	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	2060,60	897,22	38,21	1041,97	1080,19	0,00	65,75	0,00	17,44	-2,00E-13
1996	2584,16	1033,08	40,65	1424,51	1465,16	10,56	51,52	0,00	23,85	-1,03E-12
1997	1620,63	801,50	22,84	863,98	886,83	-6,18	-75,99	0,00	14,46	-4,18E-13
1998	2625,68	1017,31	71,65	1450,27	1521,92	0,22	61,95	0,00	24,28	-8,09E-13
1999	2840,67	1065,02	40,84	1695,65	1736,49	-1,38	12,15	0,00	28,39	-3,03E-12
2000	2626,52	1020,99	49,20	1560,84	1610,05	11,01	-41,66	0,00	26,13	-2,68E-12
2001	1959,64	924,75	35,57	966,23	1001,80	-6,47	23,38	0,00	16,18	-8,91E-13
2002	1969,36	876,66	33,59	1085,20	1118,79	-6,21	-38,05	0,00	18,17	3,73E-13
2003	2233,64	917,72	59,44	1232,28	1291,72	-0,33	3,90	0,00	20,63	-3,24E-12
2004	2137,87	935,49	55,46	1128,21	1183,68	1,59	-1,77	0,00	18,89	-1,90E-12
2005	2178,37	1000,14	36,44	1109,09	1145,52	-2,68	16,81	0,00	18,57	-1,18E-12
2006	2275,54	970,99	44,36	1247,18	1291,54	-0,91	-6,96	0,00	20,88	-1,52E-12
2007	2555,05	997,94	52,45	1436,08	1488,53	1,76	42,78	0,00	24,04	5,28E-13
2008	2460,35	1081,77	33,45	1361,06	1394,52	2,97	-41,69	0,00	22,79	-3,13E-12
2009	1989,08	1076,46	25,97	930,38	956,35	-2,12	-57,19	0,00	15,58	-4,18E-13
2010	2406,73	1079,00	36,53	1215,21	1251,74	1,76	53,88	0,00	20,34	-1,56E-12
2011	2396,31	1061,14	26,93	1275,90	1302,83	-10,79	21,77	0,00	21,36	2,33E-12
2012	1999,83	991,10	24,81	1027,39	1052,20	3,25	-63,91	0,00	17,20	-3,82E-13
2013	2079,67	1031,82	26,59	981,18	1007,77	-1,38	25,03	0,00	16,43	2,59E-13
2014	2288,56	1040,07	52,24	1189,57	1241,80	-3,64	-9,60	0,00	19,92	-7,92E-13
2015	1983,38	1003,64	47,44	932,90	980,34	5,42	-21,64	0,00	15,62	1,66E-12

Posteriormente, se realizó la modelación para la consecución de resultados hidrográficos a la salida de la cuenca en estudio, aclarando que lo ideal y aconsejable es contar con estaciones hidrográficas a la salida de esta, sin querer afirmar que la modelación sea errada, por no contar con registros como es el caso de la cuenca de salida del río Coello (Figura 31). Por lo anterior, es importante precisar que la herramienta HydroBID es un modelo de gestión de recursos hídricos y no de análisis hidrodinámicos, por lo que, aunque no se cuente directamente con una estación para calibración en la subcuenca estudiada o se presenten diferencias en los picos de caudales altos o bajos, si se cuenta con una buena coincidencia de la curva de duración caudales y parámetros estadísticos, con lo que se puede concluir que se está caracterizando de manera adecuada el volumen de agua que transita por la cuenca, lo cual es el resultado deseado.

Por lo expuesto anteriormente, a continuación, se presentan en la Tabla 10 los resultados del balance hídrico de la cuenca total del río Coello en su salida al río Magdalena. (subcuenca codificada 301529100, ver Figura 10).

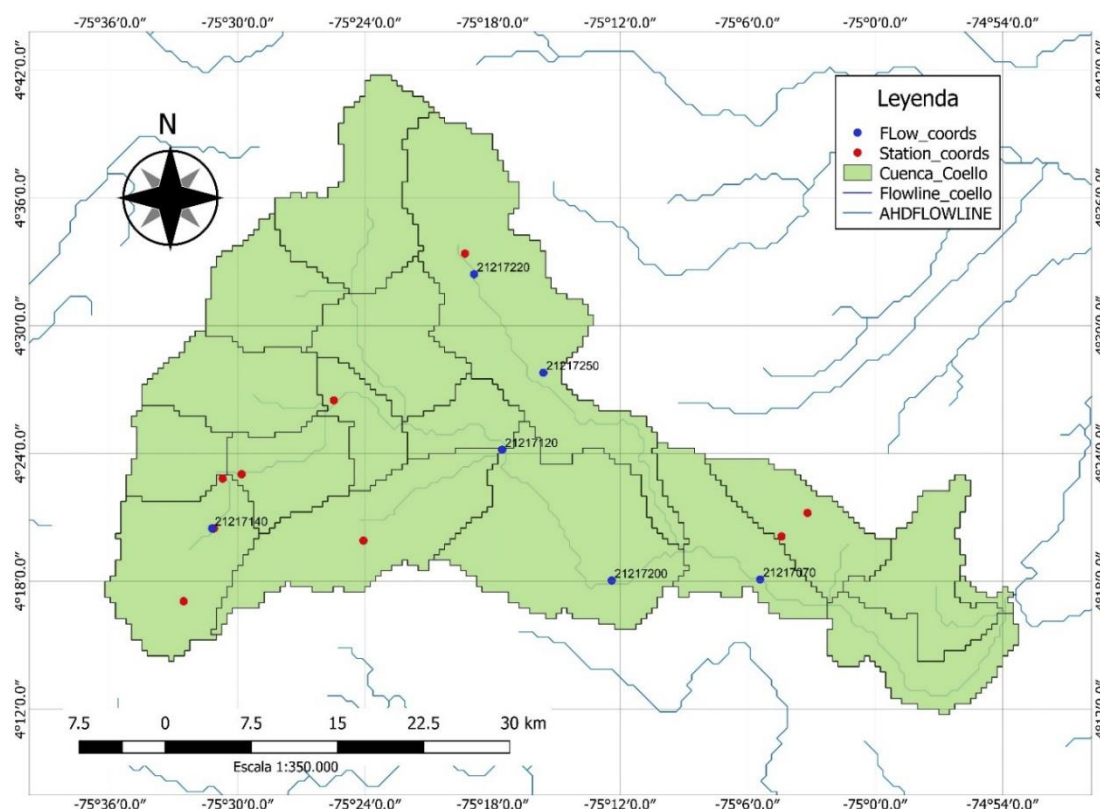


Figura 31. Delimitación de la cuenca total del río Coello hasta su salida al río Magdalena con la base de datos LAC-AHD incluyendo estaciones Hidroclimatológicas

Tabla 10. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello hasta salida.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escorrentía (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almacenamiento no saturado	% almacenamiento saturado	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	2394,98	1023,45	98,95	1147,68	1246,63	0,00	102,23	0,00	22,68	7,82E-13
1996	2944,59	1173,88	100,30	1582,44	1682,74	10,56	45,75	0,00	31,67	-3,10E-12
1997	1894,96	904,11	72,14	977,37	1049,51	-4,00	-74,73	0,00	20,08	-1,23E-12
1998	3105,81	1167,55	180,66	1643,07	1823,73	-2,52	83,23	0,00	33,82	1,35E-12
1999	3276,09	1207,71	113,33	1908,56	2021,89	-1,38	8,94	0,00	38,93	2,25E-13
2000	2974,84	1147,55	109,31	1727,69	1837,01	11,01	-55,12	0,00	34,39	9,19E-13
2001	2356,19	1067,14	104,73	1113,12	1217,85	-5,86	53,62	0,00	23,45	-2,03E-12
2002	2401,41	1030,36	102,90	1287,27	1390,17	-7,82	-39,47	0,00	28,17	-2,30E-12
2003	2634,88	1041,16	143,39	1434,40	1577,79	-0,33	-14,38	0,00	30,64	-3,32E-12
2004	2529,32	1058,93	121,23	1321,19	1442,41	1,59	-2,05	0,00	28,44	-4,20E-12
2005	2580,67	1137,03	106,53	1290,80	1397,33	-2,68	21,42	0,00	27,56	-1,32E-12
2006	2691,91	1141,65	96,92	1438,05	1534,97	-0,96	-14,07	0,00	30,33	-5,23E-12
2007	2963,52	1122,36	123,42	1630,72	1754,14	3,94	49,41	0,00	33,68	2,01E-12
2008	2916,12	1240,10	114,24	1567,91	1682,15	0,48	-39,63	0,00	33,02	-1,56E-12
2009	2358,80	1215,62	77,44	1128,27	1205,70	-1,78	-86,11	0,00	25,37	-2,89E-12
2010	2840,97	1223,26	118,39	1401,07	1519,46	2,32	66,38	0,00	29,54	-4,73E-13
2011	2725,11	1206,51	69,87	1421,96	1491,83	-13,49	11,67	0,00	28,59	2,38E-12
2012	2305,00	1108,81	66,18	1169,87	1236,05	3,83	-67,94	0,00	24,25	-2,73E-14
2013	2432,92	1172,21	75,12	1137,83	1212,95	-2,51	26,09	0,00	24,18	1,14E-12
2014	2784,51	1204,36	155,23	1383,46	1538,69	-3,61	15,56	0,00	29,51	2,33E-12
2015	2364,97	1123,46	126,18	1117,31	1243,48	7,06	-33,78	0,00	24,75	4,12E-12

Del balance de la cuenca se puede destacar la correlación directa de la variación de precipitación con respecto al flujo total de la cuenca, tal y como se evidencia en la Figura

32, en donde se representan los años con mayores incrementos de precipitación y por tanto de flujo. Los valores de precipitación media anual en la cuenca son del orden de 2641 centímetros, con una media de flujo de 1481 Mm³.

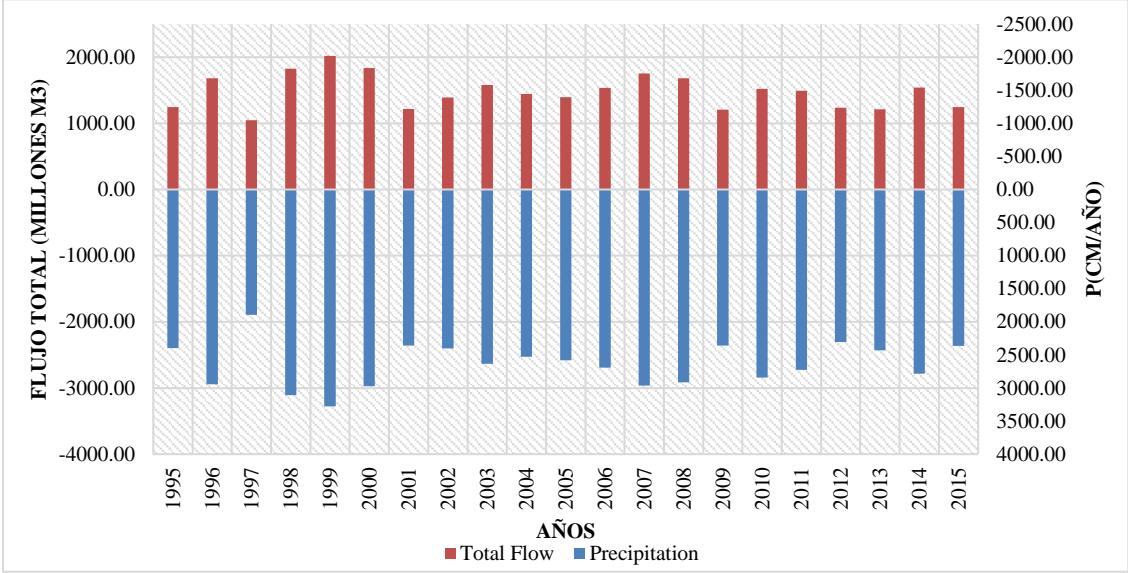


Figura 32. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en su Estado Actual

Del mismo modo, en la Figura 33 se observa el balance de humedad de la cuenca en las décadas modeladas, indicando una tendencia similar entre la evapotranspiración y la precipitación anual, con una media anual de evapotranspiración de 1129 centímetros contra los 2641 centímetros de precipitación ya mencionados.

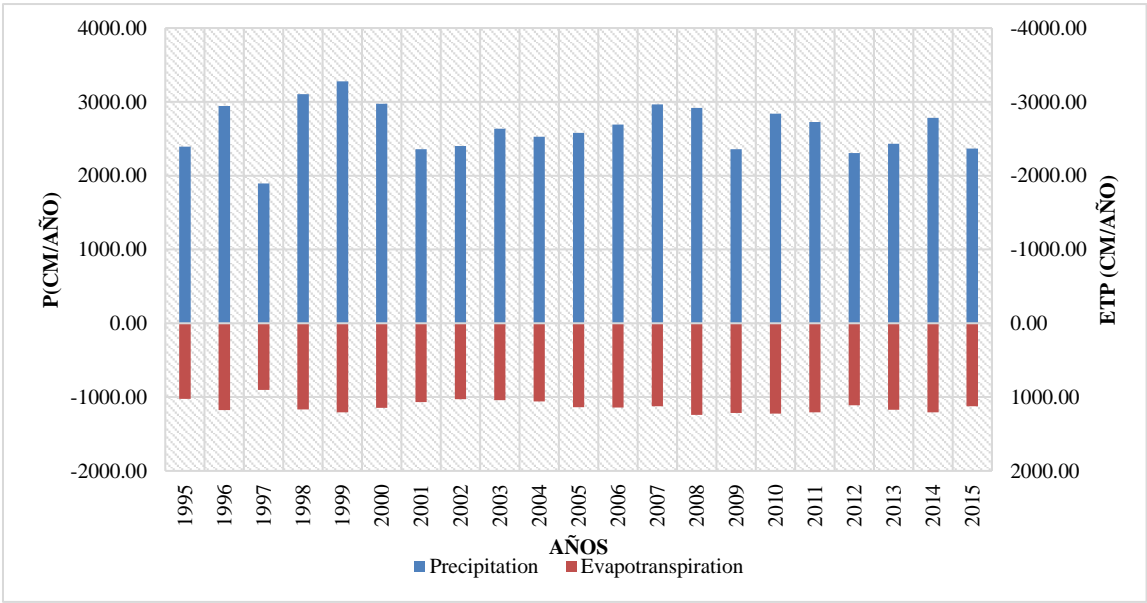


Figura 33. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en su Estado Actual

2.4. Escenario de Cambio Climático

Para el escenario de cambio climático, se realizaron las modelaciones considerando un aumento de la temperatura en los próximos años de 2°C, junto con un aumento y disminución de la precipitación de un 20%. A continuación, se presentan los resultados de dichas modelaciones, iniciando con incremento de temperatura y precipitación (Escenario 1, Tabla 11), y posteriormente incremento de temperatura y disminución de precipitación (Escenario 2, Tabla 12).

Tabla 11. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello para el escenario 1 de cambio climático.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escurren tía (cm)	Volumen de agua subterránea a al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almacenamiento no saturado	% almacenamiento saturado	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	2873,98	1137,28	156,21	1425,36	1581,57	0,00	127,22	0,00	27,91	1,73E-12
1996	3533,51	1307,17	157,81	1961,25	2119,07	10,51	57,85	0,00	38,90	4,14E-12
1997	2273,95	1004,32	111,93	1228,86	1340,79	-4,05	-92,10	0,00	24,98	-3,46E-13
1998	3726,97	1300,56	281,43	2012,51	2293,94	-2,27	93,83	0,00	40,91	-5,37E-12
1999	3931,31	1348,62	182,46	2339,94	2522,39	-1,69	14,79	0,00	47,19	-4,76E-12
2000	3569,81	1280,73	179,43	2118,07	2297,50	11,20	-61,40	0,00	41,78	1,63E-12
2001	2827,43	1188,56	169,98	1387,69	1557,68	-6,36	58,66	0,00	28,89	6,82E-13
2002	2881,69	1149,83	166,59	1588,48	1755,06	-7,21	-50,23	0,00	34,22	1,49E-12
2003	3161,85	1164,39	225,88	1751,08	1976,96	-0,32	-15,96	0,00	36,78	-3,57E-12
2004	3035,19	1182,91	191,19	1627,19	1818,39	1,09	-1,72	0,00	34,52	-2,12E-12
2005	3096,81	1267,51	170,97	1599,45	1770,42	-2,66	27,94	0,00	33,60	-2,35E-12
2006	3230,30	1277,20	158,05	1774,83	1932,87	-0,25	-16,53	0,00	37,01	-2,88E-12
2007	3556,23	1253,50	203,61	1997,41	2201,02	3,49	57,50	0,00	40,71	-3,15E-12
2008	3499,35	1385,82	178,63	1938,58	2117,20	1,26	-45,24	0,00	40,31	3,59E-12
2009	2830,57	1363,25	125,24	1414,14	1539,38	-2,38	-100,92	0,00	31,23	-3,60E-12
2010	3409,16	1371,94	184,33	1736,73	1921,06	2,24	77,79	0,00	36,13	-1,44E-12
2011	3270,13	1345,51	118,99	1769,69	1888,68	-13,35	14,10	0,00	35,18	-7,09E-13
2012	2766,00	1241,10	108,76	1464,09	1572,85	3,52	-81,53	0,00	30,06	-2,68E-12
2013	2919,50	1308,96	121,60	1426,80	1548,40	-2,81	35,05	0,00	29,91	-5,18E-13
2014	3341,42	1353,63	231,55	1711,86	1943,41	-2,93	11,31	0,00	35,99	-1,22E-12
2015	2837,97	1264,53	192,55	1381,76	1574,30	7,28	-38,21	0,00	30,06	3,36E-12

Para el escenario de cambio climático número 1, se observa un flujo total promedio de 1870 Mm³/ año, con una precipitación media al año de 3170 centímetros. (Figura 34). De la misma forma, los resultados de evapotranspiración se encuentran en promedio de 1262 centímetros al año (Figura 35). Lo anterior manteniendo sus correlaciones directas en cuanto a las variaciones de precipitación anual, al igual que las condiciones actuales de la cuenca.

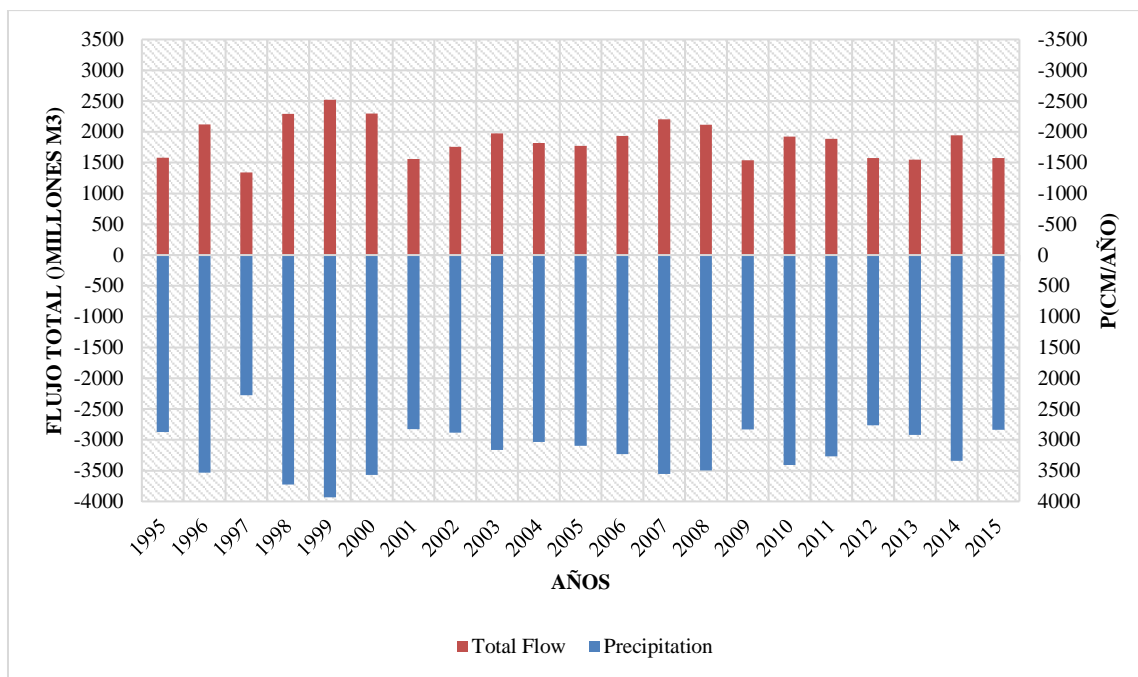


Figura 34. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en escenario 1

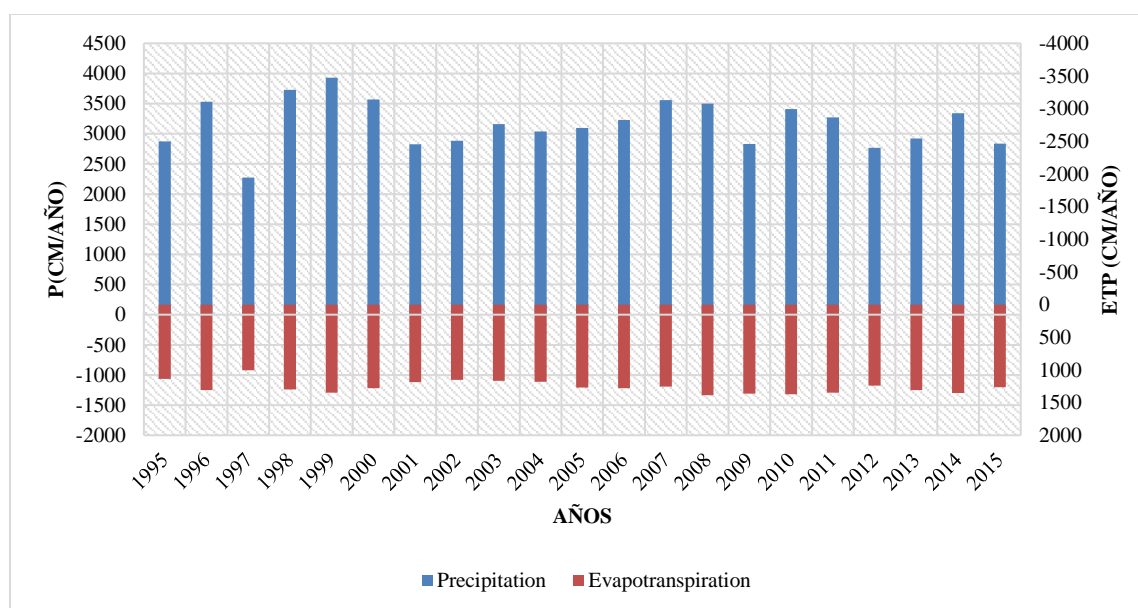


Figura 35. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en Escenario 1

Para el escenario 2, se observan valores totales de flujo promedio de 929 Mm³ al año, con precipitaciones promedio de 2113 centímetros al año (Figura 36). Para la evapotranspiración calculada, se tiene un valor promedio anual 1165 centímetros.

Tabla 12. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello para escenario 2 de cambio climático.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escoorrentía (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almacenamiento no saturado	% almacenamiento saturado	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	1915,99	1053,60	53,77	731,60	785,37	0,00	62,30	0,00	14,72	-1,83E-12
1996	2355,67	1229,96	54,34	1009,75	1064,09	9,52	31,52	0,00	20,58	6,64E-13
1997	1515,97	905,14	43,03	608,06	651,09	-3,40	-49,61	0,00	12,75	6,46E-13
1998	2484,65	1217,02	98,66	1088,90	1187,56	-3,25	60,30	0,00	23,02	-2,73E-13
1999	2620,87	1276,61	61,01	1253,63	1314,64	-0,48	4,01	0,00	26,10	5,49E-13
2000	2379,87	1200,43	55,01	1134,24	1189,25	9,36	-42,12	0,00	22,97	1,26E-12
2001	1884,95	1078,34	54,36	699,66	754,01	-5,83	43,29	0,00	15,14	4,91E-13
2002	1921,12	1042,68	54,82	836,75	891,57	-5,50	-26,34	0,00	18,72	-8,73E-13
2003	2107,90	1073,37	78,92	948,43	1027,35	0,00	-13,61	0,00	20,79	-7,28E-14
2004	2023,46	1084,36	65,34	851,66	917,00	0,57	2,59	0,00	18,94	-5,12E-12
2005	2064,54	1176,28	55,47	809,39	864,85	-1,40	6,85	0,00	17,96	7,67E-13
2006	2153,53	1161,31	50,81	930,75	981,55	-0,05	-9,11	0,00	19,83	-2,54E-12
2007	2370,82	1187,97	61,02	1061,18	1122,20	3,05	35,22	0,00	22,37	-2,53E-12
2008	2332,90	1309,68	64,13	973,20	1037,33	-4,27	-30,98	0,00	21,14	-5,23E-13
2009	1887,04	1245,02	41,55	645,34	686,90	-0,38	-59,89	0,00	15,39	1,72E-12
2010	2272,77	1270,85	67,29	869,43	936,72	3,75	42,45	0,00	19,01	5,13E-12
2011	2180,08	1251,48	33,80	876,45	910,25	-11,90	12,21	0,00	18,03	9,69E-13
2012	1844,00	1125,38	34,57	708,17	742,74	1,07	-40,21	0,00	15,03	-2,23E-13
2013	1946,33	1200,95	39,09	684,41	723,50	-0,40	7,13	0,00	15,16	1,57E-12
2014	2227,61	1233,22	92,77	867,32	960,08	-3,62	18,82	0,00	19,11	-1,82E-12
2015	1891,98	1146,28	74,46	684,83	759,29	0,47	-29,94	0,00	15,88	2,27E-12

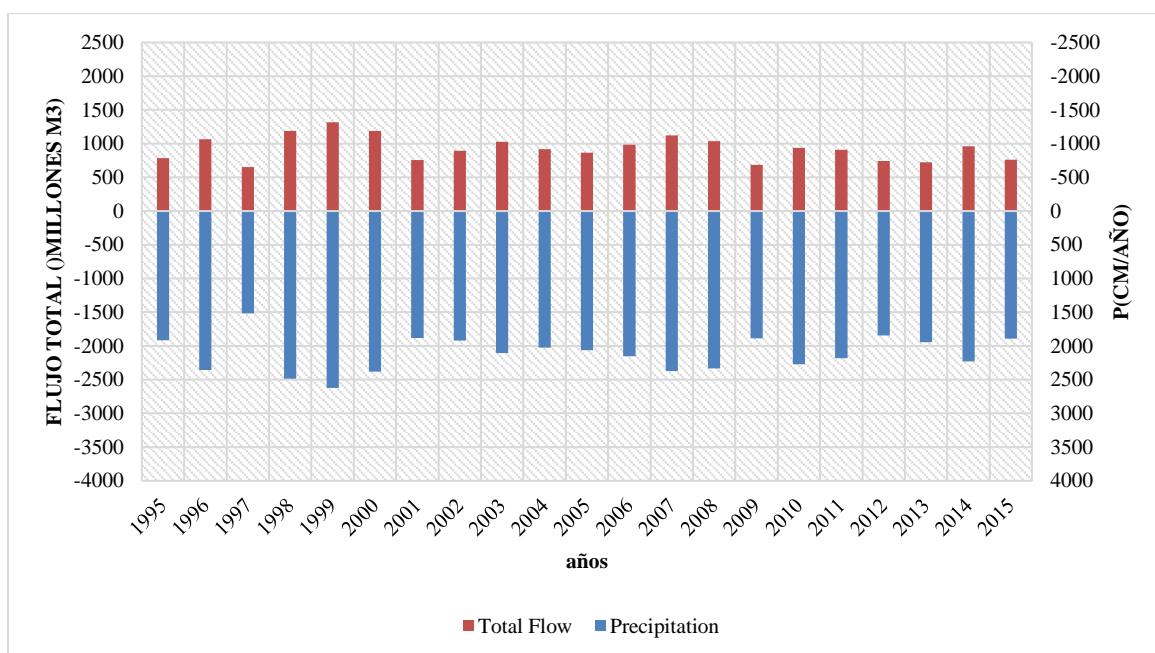


Figura 36. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en escenario 2

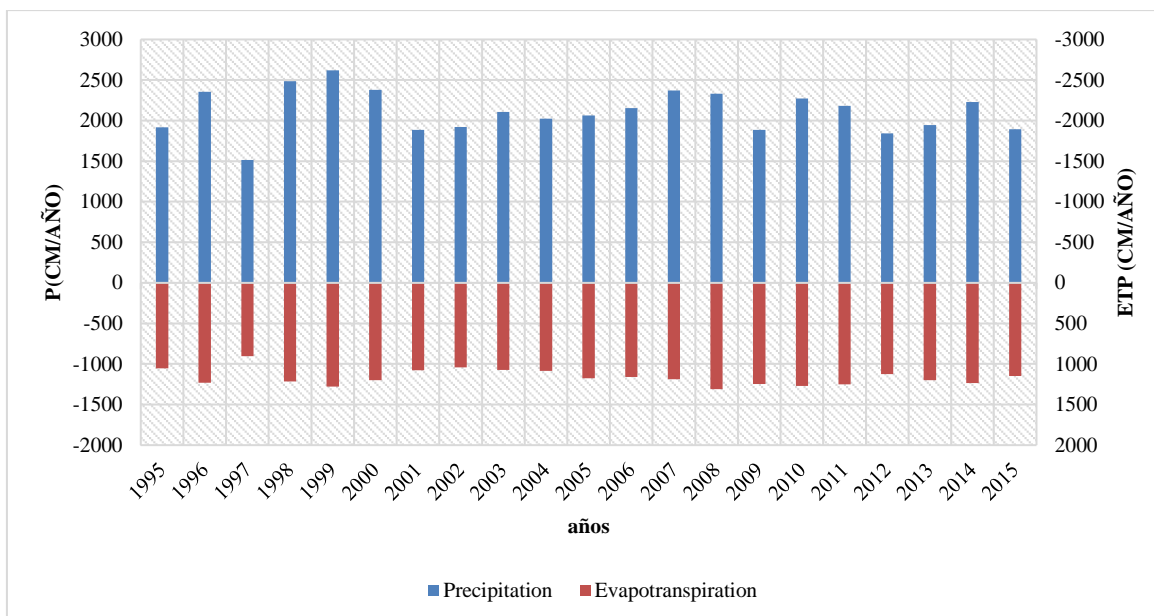


Figura 37. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en escenario 2

3. DISCUSIÓN

Como punto de partida para la verificación de los resultados alcanzados, se obtuvieron y analizaron diferentes estudios realizados por el IDEAM y la Corporación Autónoma Regional del Tolima, sobre el territorio colombiano y, específicamente, sobre la cuenca del río Coello, observándose que la herramienta HydroBID logra una adecuada caracterización hidrográfica de la cuenca, con volúmenes de flujo bastante próximos a los observados en la estación Payande, siendo esta la estación más próxima a la salida de la cuenca en el río Magdalena.

Los resultados del balance hídrico correspondientes a la modelación del estado actual, dan cuenta de una oferta hídrica media de $804.017 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ equivalente a $25,50 \text{ l/s/km}^2$, lo que es bastante próximo a lo definido por el ENA 2014 (IDEAM, 2015), para la cuenca alta del río Magdalena, cuenca a la que pertenece el río Coello, con un valor para año medio de $769.077 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$, equivalente a $24,39 \text{ l/s/km}^2$ (Figura 38). De igual manera, en la actualización del ENA 2018 (IDEAM ENA, 2018), se determinó, para la cuenca mayor del río Coello, una oferta hídrica para el año medio de $774.782 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ equivalente a $24,57 \text{ l/s/km}^2$. En dicho estudio, la oferta hídrica prevista para la cuenca total del río Magdalena se encuentra en promedio para año medio en $999.693 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$, equivalente a $31,70 \text{ l/s/km}^2$, por lo que, se puede considerar que, los valores propuestos por

el modelo y su respectiva calibración se encuentran acordes con la realidad hídrica de la región andina colombiana y por ende de la cuenca mayor del río Magdalena.

Por otra parte, el dato reportado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima sobre el caudal medio de la cuenca mayor del río Coello es de $31,25 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a una oferta hídrica promedio de $16,96 \text{ l/s/km}^2$ (CORTOLIMA, 2004), bastante menor al calculado en la modelación con HydroBID y al definido por el IDEAM en el ENA 2014 (IDEAM, 2015). Hechos, datos o situación que puede ser objeto de discusión respecto a las fechas del estudio de CORTOLIMA, ya que fue realizado con información climatológica anterior al año 2004, por lo que la hipótesis que se consideró tiene una mayor periodicidad en los caudales extraordinarios de la última década por efectos del fenómeno ENSO en la región (ESRL, 2018), lo que generó un incremento en los promedios de caudales medios de la cuenca entre el año 2004 y 2015, y por ende una elevación en el promedio de la oferta hídrica de esta.

Lo anterior, fue corroborado con los registros obtenidos para la modelación y que se pueden ver reflejados en los caudales observados de la Figura 29.

En cuanto a la escurrentía calculada por HydroBID, los resultados son bastante acertados, sí se comparan con los valores propuestos por el ENA 2014 (IDEAM, 2015), donde los rangos para la región Andina, ubicación de la cuenca del río Coello, están entre 800 y 1500 milímetros en promedio para el año medio colombiano, contrastados con un valor promedio para las décadas analizadas en la cuenca de acuerdo con el modelo de 1084 mm (Figura 39).

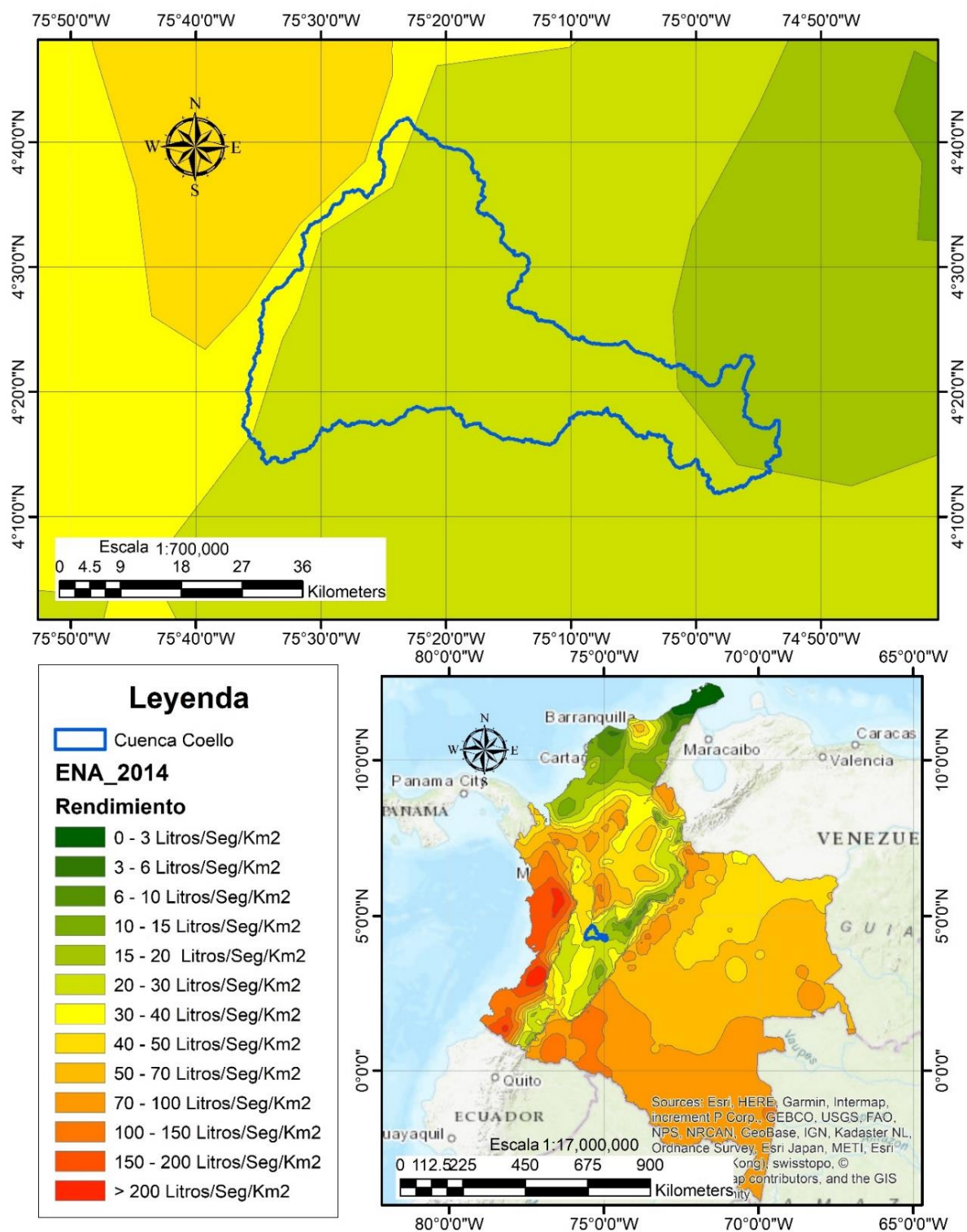


Figura 38. Rendimiento hídrico Total para condiciones de año medio en Colombia.

Fuente: adaptado IDEAM,2015.

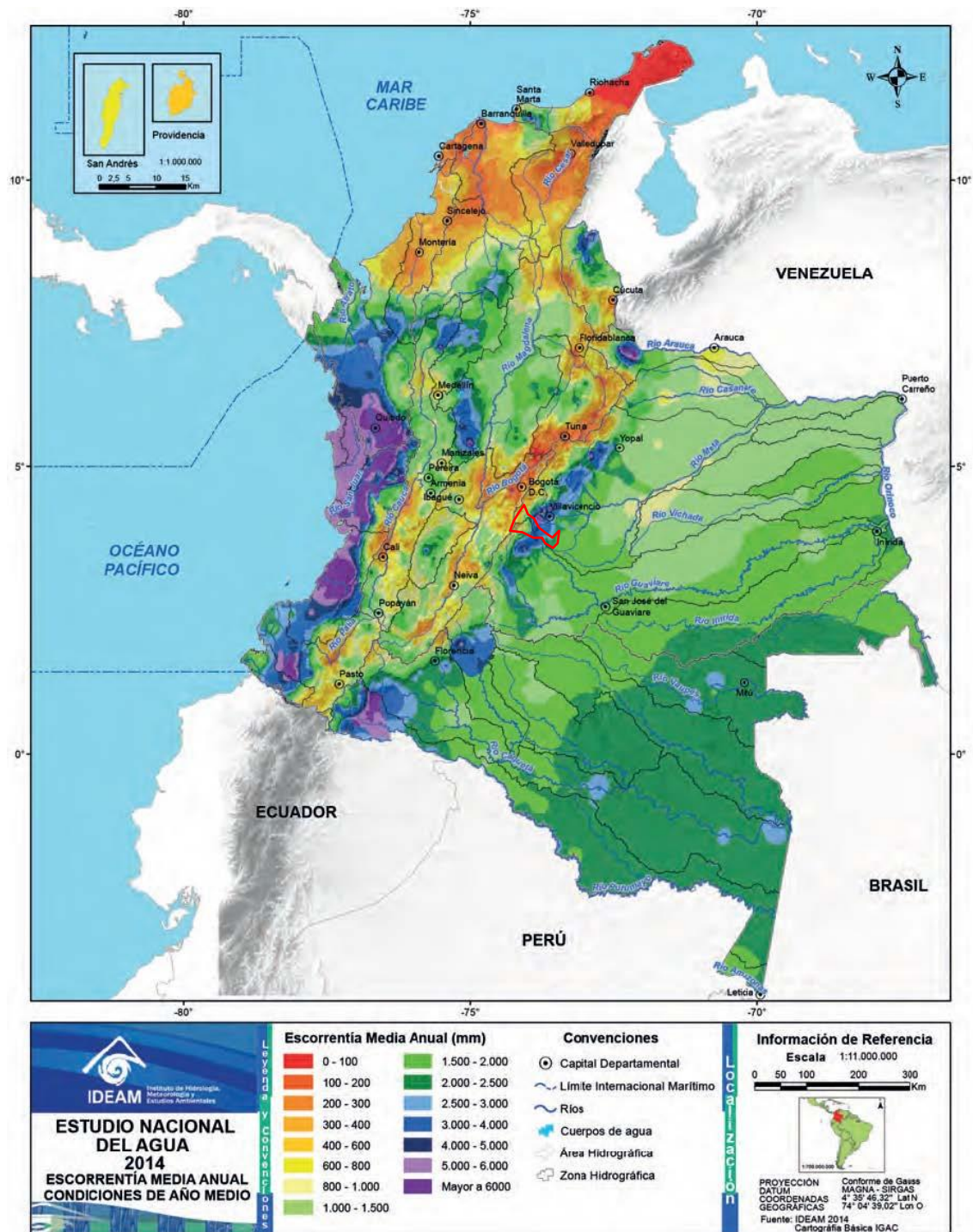


Figura 39. Escorrentía Media Anual para condiciones de año medio en Colombia.

Fuente: adaptado de figura 2.8, IDEAM,2015.

Por otra parte, obtenidos los resultados del módulo de cambio climático de HydroBID y analizados los dos escenarios propuestos, son evidentes las afectaciones provocadas por el incremento de la temperatura global en ambos escenarios, considerada en 2°C para la región en las próximas décadas, y a las variaciones de precipitación por efectos de los

fenómenos recurrentes en la zona ecuatorial americana. Lo que conduce directamente a incrementos del flujo del cauce en el escenario de mayores precipitaciones y descensos del flujo aún más considerables en el escenario con menores precipitaciones y que se ve afectado por el aumento que sufre la evapotranspiración debido al incremento en la temperatura.

En la Figura 40 se observa el comportamiento del flujo total a la salida de la cuenca comparado entre los escenarios de cambio climático y el comportamiento actual de esta, donde, además de la variabilidad climática de los escenarios propuestos, se observa una tendencia moderadamente decreciente de los flujos, lo que ya de por si es una situación negativa considerando las posibles afectaciones a futuro, respecto al abastecimiento tanto de acueductos para las poblaciones de la cuenca como para los distritos de riego que hacen uso del recurso hídrico. Igualmente, se estiman las variaciones climáticas producto del fenómeno ENSO sobre la región, donde se observa la concordancia de incrementos de flujo en diferentes años con respecto a los registros realizados por la ESRL en la temperatura del océano pacifico (Figura 41).

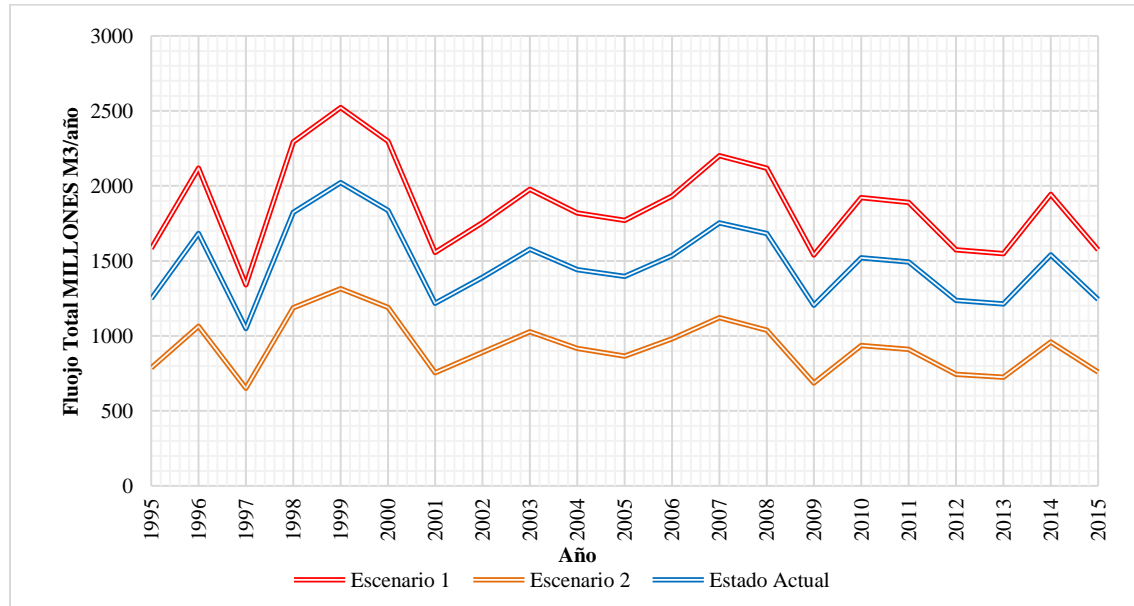


Figura 40. Comparativo de escenarios de Cambio Climático para los resultados de Flujo Total en la cuenca del río Coello

Los años más representativos para el fenómeno ENSO con descensos de temperatura del océano pacífico y por ende incrementos de precipitaciones extraordinarias en la región colombiana fueron, 1996, 1999, 2008 y 2011 (ESRL, 2018).

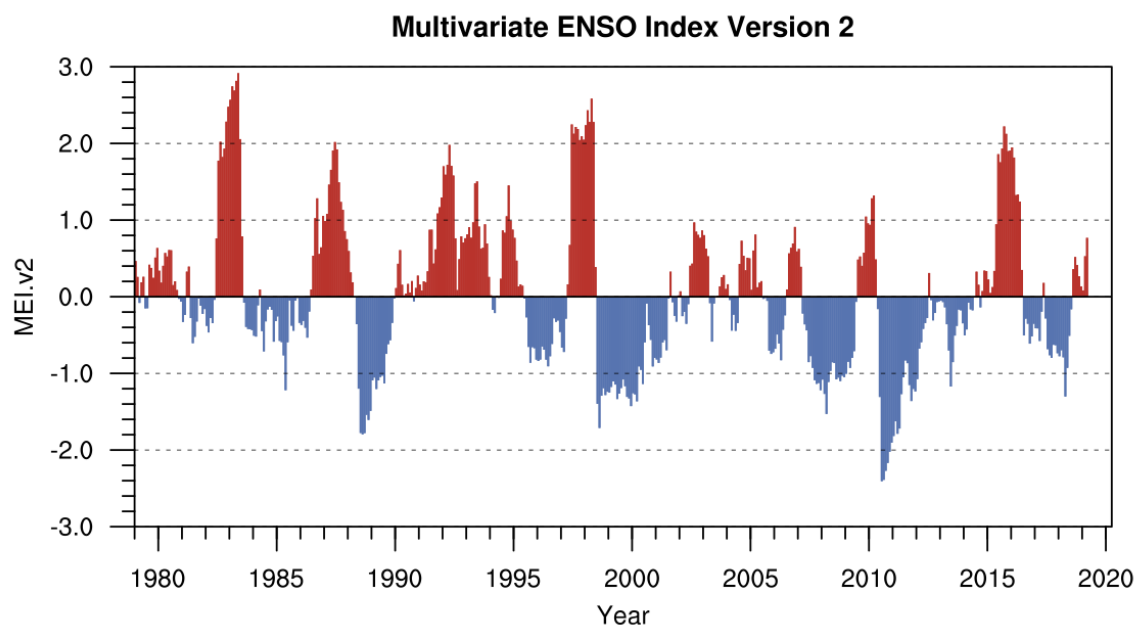


Figura 41. Total Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)

Fuente: adaptado de: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#ElNino>

Por otro lado, los resultados del escenario 1, dan cuenta de un incremento de Evapotranspiración de 12% con un aumento del flujo total de 26%, lo que indudablemente podría generar problemas en la hidrodinámica del cauce y sobre niveles tanto en caudales medios como en extraordinarios, lo que llevaría a posibles amenazas de desbordamientos o inundaciones en zonas ribereñas (IDEAM ENA, 2018).

Los resultados del escenario 2 muestran un incremento de la evapotranspiración del 3% y descensos más considerables del flujo total de la cuenca aproximadamente en un 38%, lo que resulta un valor bastante relevante a la hora de medir la oferta hídrica a futuro y que servirá para las evaluaciones de aprovechamiento del recurso hídrico. Con este escenario que, a juicio del autor, se consideraría el más probable de acuerdo con la tendencia decreciente de flujo del cauce y los pronósticos de cambio climático realizados por el IPCC (IPCC, 2014), la oferta hídrica caería en las próximas décadas a un valor aproximado de 504.343 m³/km²/año.

Por otra parte, de acuerdo con IDEAM, et al. (2015) se tiene previsto que, para el departamento del Tolima, donde se ubica la cuenca del río Coello, se presenten incrementos de temperatura en un rango de valores de 0,9 °C y 2,3°C entre los años 2011 – 2100, con incrementos de la precipitación media en el mismo periodo de 10,54% a

17,24%, con un pronóstico de mayor aumento de precipitación en la zona de Nivales entre el 30% y 40%, dándole mayor fuerza a la hipótesis del escenario 1. Por lo anterior, se podrían reflejar efectos de mayores escorrentías y aumento de zonas erosionables, al presentarse afectaciones en las coberturas de tierra actual causadas por incrementos de precipitaciones y temperatura.

Considerando los resultados analizados, es natural pensar que se requerirá una intervención, en un corto plazo, de las autoridades ambientales colombianas para considerar un plan de gestión y manejo integral de la cuenca, realizando programas socio ambientales ante el cuidado y preservación del recurso hídrico en las comunidades de toda la cuenca, particularmente sobre los principales actores que se benefician y cuentan con procesos de explotación hídrica y minera en esta.

De igual manera, dentro de los programas de gestión de la cuenca se pueden tomar medidas de control como zonas de embalses, con el fin de laminar los efectos de crecientes extraordinarias que se podrían presentar ante el escenario 1 modelado, y contar con una regulación y reserva de caudales medios para zonas aguas abajo de los embalses o represas, lo que ayudaría en gran medida a la minimización de desabastecimiento para los beneficiarios del río.

4. CONCLUSIONES

La construcción y calibración del modelo HydroBID para la cuenca hidrográfica seleccionada con base en la información hidroclimatológica disponible fue favorable, logrando una calibración eficaz con volúmenes de error mínimos y aproximaciones altas en la correlación de los valores observados y los calculados por el modelo, dando así una confiabilidad alta en la respuesta del modelo respecto a la metodología de lluvia-escorrentía utilizada, a los parámetros de cobertura terrestre y tipo de suelo predefinidos y a la practicidad en su calibración, fundada en la modificación de parámetros hidrológicos e hidráulicos básicos.

Una vez analizados y discutidos los resultados del modelo HydroBID para la cuenca Coello, se puede establecer que dicha herramienta arroja resultados aceptables y

concordantes para la caracterización actual de una cuenca hidrográfica colombiana, con márgenes de variación menores al 5% con respecto a estudios realizados para la cuenca y para la región hidrográfica del río Magdalena.

Respecto a los resultados de los escenarios de cambio climático sobre la cuenca, se pueden comprender las fortalezas de la herramienta HydroBID para la toma de decisiones inmediatas sobre la gestión de los recursos hídricos de una región, encaminados a la mitigación de impactos sobre las necesidades de poblaciones y territorios aferentes a las cuencas modeladas.

De igual manera, la ventaja de la disponibilidad de variación de valores como la temperatura y la precipitación, tanto de manera anual como mensual, que se encuentran ampliamente estudiados y analizados en los diferentes estudios de cambio climático a nivel regional y global, dan una confiabilidad importante de los resultados que se obtienen de la herramienta para así proponer medidas particulares de control.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Breña, A., Jacobo M., 2006: Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, 289.
- Chow V., Maidment, D., Mays, L., 1994. Hidrología Aplicada, 584.
- CORTOLIMA, 2004: Proyecto Plan de Ordenación y manejo de la Cuenca hidrográfica mayor del río Coello – Convenio CORTOLIMA – CORPOICA – SENA. UNI. TOLIMA. <https://www.cortolima.gov.co/contenido/ii-fase-diagnostico-r%C3%ADo-coello-0>
- DANE, 2018: Censo Nacional de población y Vivienda 2018, Colombia. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv-presentacion/src/#donde00>
- ESRL, 2018: El Niño/*Southern Oscillation* (ENSO), <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#ElNino>
- Haith, D.A., R. Mandel, R., and R.S. Wu. 1996. *Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0 User's Manual*. 64. <http://sp.hydrobidlac.org/>
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- IDEAM, 2013: Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. 47.
- IDEAM, 2015: Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D.C. 496.
- IDEAM, 2017: Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá, D.C. 266.
- IDEAM, 2018. Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica, Bogotá, D.C. 59.
- IDEAM, ENA 2018: Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, D.C. 452.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, 2015: Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones– Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá, D.C. 60.
- IDEAM, Tomo 1, 2015: Colombia afectada por El Niño y la Niña en el periodo 2012 a 2014 y proyecciones climáticas a 90 años. Bogotá, D. C. 100.
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157.

- Montealegre J. E.; (1990) Técnicas Estadísticas aplicadas en el manejo de datos Hidrológicos y Meteorológicos, 45.
- Ochoa, T., 2011. Hidraulica de Ríos y Procesos Morfológicos, 704.
- Pascual, J., Diaz, M., 2016. Guía práctica sobre la modelación hidrológica y el modelo HEC – HMS, 155.
- Pizarro, R., González, P., Witterssheim, M., Saavedra, J., Soto, C., 1993. Elementos técnicos de hidrología III. Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América latina y el caribe. Universidad de Talca, 135.
- SPOC HydroBID. (2019) Curso HydroBID: Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe
- UNDP. 2018: *Human Development Indices and Indicators 2018 Statistical Update. United Nations Development Programme*, New York, USA. 123.